

El Hombre en las Grandes Alturas Habitadas

DR. ALBERTO HURTADO *

El hombre que habita en alturas elevadas está sujeto a ciertas influencias desfavorables en lo que concierne a la adquisición de oxígeno a nivel pulmonar y al suministro de este gas a los tejidos.

No hay reserva de oxígeno en el organismo y como es sabido, este gas es indispensable para las actividades metabólicas. Por consiguiente, el hombre en la altura debe desarrollar ciertas modificaciones adaptativas al medio ambiente. Como lugar de estudio de estos problemas hemos escogido la localidad de Morococha, situada a 4,540 metros (14,900 pies) de altura, con una presión barométrica media de 444 mm Hg, en contraste con 760 mm Hg al nivel del mar.

Vamos a exponer algunos datos relacionados con la adaptación del habitante nativo a las condiciones desfavorables de una presión ambiental reducida; ellos se refieren a trabajos realizados desde 1930, algunos en colaboración con mis asociados, otros llevados a cabo en forma personal.

Antes de entrar a la enumeración de las características del hombre de Morococha, creo que es necesario llamar la atención sobre ciertos aspectos respiratorios, cuyo conocimiento es fundamental para comprender por qué este sujeto difiere del hombre que reside a nivel del mar. La sangre venosa al circular por el circuito pulmonar adquiere oxígeno en virtud de un proceso físico de difusión, y lo transporta, principalmente en combinación con la hemoglobina circulante, hasta los tejidos donde parte de este gas es liberado y pasa, también por difusión, al medio tisular para ser utilizado en las actividades metabólicas. En ambos procesos tiene importancia fundamental la presión parcial del oxígeno y está reducida en la altura, como vemos en el siguiente cuadro:

* Director de Investigaciones del Instituto de Biología Andina.

	<i>Lima</i>	<i>Morococha</i>
pO ₂ traqueal	147	84 mm Hg
pO ₂ alveolar	98	50 " "
pO ₂ capilares	70	38 " "

El oxígeno en el aire inspirado tiene una presión parcial de 84 mm Hg en Morococha, en contraste con 147 mm Hg en Lima. Al nivel alveolar, ya en contacto con la sangre circulante, la presión, disminuido por efecto de estar saturado el aire con vapor de agua, es más o menos la mitad en el lugar elevado, y más adelante, en el tramo capilar, en contacto ahora con los tejidos, hay también una marcada diferencia entre los dos lugares. La hemoglobina de los glóbulos rojos se satura más o menos 80 % en Morococha a nivel pulmonar, mientras que en Lima el grado de saturación es aproximadamente 96—98 %. El hombre pues que vive a la altura de Morococha tiene que adaptarse a estos cambios en el oxígeno que necesita, y lo hace mediante ciertos procesos, unos de carácter físico y otros funcionales. Enumeraremos algunos de ellos.

Estatura.—Es conocido que el habitante nativo de Morococha tiene una baja estatura, como el hombre indígena en general. En 1928, de la medición de varios centenares de sujetos entre 19 y 39 años de edad, encontramos un promedio de estatura de 1.59 metros. Iguales estudios al nivel del mar, en hombres de raza blanca, dieron una media de 1.68 metros. Estudios comparativos con sujetos estudiados en otros países confirman la baja estatura de nuestra raza indígena.

Peso. Es notoria la ausencia de obesidad en el hombre nativo de altura. Este es delgado, musculoso. En algunos, el abdomen es ligeramente prominente. Las extremidades son delgadas. La relación entre peso/estatura tiene un valor medio de 37.0 en los sujetos estudiados en Lima, y de 32.6 en los nativos de Morococha.

Volumen torácico.—Es una observación habitual la notable amplitud torácica en el hombre de altura. El tórax es grande, algo redondeado, con aumento de los diámetros antero-posterior y transversal. En cambio, en estudios radiográficos se aprecia un nivel más alto del diafragma con acortamiento del diámetro longitudinal. Midiendo el área pulmonar por medio de un planímetro, en radiografías torácicas obtenidas a 2 metros de distancia, hemos comprobado una mayor área pulmonar en los sujetos de altura. Multiplicando el área pulmonar por el diámetro antero-posterior del tórax, se obtiene

una cifra que corresponde al llamado "volumen radiológico" del tórax. Este volumen, en posición inspiratoria, es más o menos igual en el sujeto de la costa y en el habitante de la altura, pero relacionándolo con la estatura y área de superficie corporal, el valor es indudablemente más alto en Morococha.

Peso/Estatura	37.0	32.6
Volumen radiológico torácico	12.84	12.53
Vol. radiol./Estatura	7.57	8.28
Vol. radiol./Ar. sup. corp.	7.48	8.36
Diam. ant-post. torácico	20.5	22.0
Diam. transversal torácico	28.8	29.2
Diam. longit. torácico	25.2	22.8
Diam. ant-post./Diam. transv.	71.4	74.3

A la característica física de un mayor volumen torácico en el residente nativo de Morococha, corresponde un volumen más elevado de aire en los pulmones. Esto lo hemos comprobado en un número considerable de determinaciones de aire residual, o sea aire contenido en las cavidades alveolares. En Lima, el valor medio de este volumen es de 1.50 litros más o menos; en Morococha se eleva a 2.000 litros aproximadamente. Esta condición puede clasificarse como un estado de enfisema fisiológico, para diferenciarlo del enfisema de carácter patológico. Representa un proceso compensatorio, posiblemente facilitando el intercambio gaseoso a nivel pulmonar. Se encuentra también en sujetos que residen en la altura, pero que no son de raza indígena.

Hiperventilación.—Para ceder oxígeno a la sangre circulante cierta cantidad de aire penetra a los pulmones en cada movimiento respiratorio de inspiración. En la altura, esta cantidad de aire aumenta y existe, por lo tanto, un estado de *hiperventilación* y esto es evidente tanto en situación de reposo como en la actividad física. En descanso, el hombre de Lima ventila aproximadamente 8.00 litros de aire por minuto; en Morococha el promedio es de 0.40 litros. Este aumento de ventilación se efectúa por medio de respiraciones más frecuentes; en cambio el volumen individual de cada inspiración es menor. La hiperventilación es un importante proceso compensatorio. En virtud de ella se eleva algo la presión parcial de oxígeno a nivel alveolar, compensando así en parte la disminución causada por la menor presión barométrica.

Ya que hablamos de oxígeno, podemos mencionar que el hombre de Morococha consume igual cantidad de este gas en los tejidos, en proporción a su área de superficie corporal. Esto es cierto en situación de reposo y ha sido también comprobado por Contreras y Velásquez, en trabajos realizados en lugares elevados.

Hematología.—El estudio de este aspecto ha sido hecho por numerosos investigadores desde hace muchos años. Se ha comprobado la existencia de un proceso de policitemia en la altura. En Lima, el hombre sano tiene un promedio de 5.12 millones de glóbulos rojos por milímetro cúbico; en la altura, en el residente nativo, esta cifra se eleva a 6.42 millones. Los glóbulos rojos contienen hemoglobina, que es la substancia transportadora de oxígeno. En Lima hay más o menos 15.60 gramos de hemoglobina por cada 100 centímetros cúbicos de sangre; en Morococha la sangre contiene 20.20 gramos en igual volumen. Es interesante mencionar que los hematíes circulantes tienden a tener un tamaño más grande en la altura. El diámetro medio de estos glóbulos es 7.48 micras en Lima; en Morococha alcanza a la cifra de 7.74 micras. Respecto a la cantidad total de sangre circulante, hay también variaciones definidas. El empleo de ciertos métodos permite conocer el volumen total de la sangre que se encuentra en el sistema vascular. Generalmente este volumen se expresa en relación con el peso corporal. En Lima, el hombre adulto tiene un promedio de 85.2 cc. de sangre por kilo de peso; en Morococha, el nativo presenta un volumen de 105.2 cc. por kilo de peso. El aumento de la cantidad total de sangre circulante se debe a un mayor volumen de los hematíes. El plasma, en cambio, está algo disminuido en la altura. Así, el volumen de hematíes, en cc. por kilo de peso, es 38.5 cc. en Lima y 67.0 cc. en Morococha. El volumen plasmático presenta los valores de 46.5 cc. por kilo de peso en la costa y de 37.6 cc. en la altura.

El aumento de la sangre total circulante, debido a un mayor volumen de sus glóbulos rojos, es un proceso compensatorio en la altura. Permite un aumento en la cantidad total de oxígeno transportado por la hemoglobina.

Merino y Reynafarje han llevado a cabo en la altura exámenes histológicos de la médula ósea, que es el tejido donde se forma la mayor parte de las células de la sangre. Estos investigadores han comprobado un estado de hiperactividad en la forma-

ción de las células correspondientes a la serie roja. En cambio, la formación de las células blancas, es normal.

Sangre arterial.—Es sangre que viene del circuito pulmonar y que es obtenida, para análisis antes de que llegue a los tejidos donde se realiza un intercambio gaseoso. Esta sangre contiene una menor cantidad de anhídrido carbónico en la altura, comparada con la del nivel del mar. En Lima, el contenido de este gas es de 45.70 volúmenes por 100 cc. de sangre; en Morococha, el promedio es de 34.70 cc.

La hemoglobina tiene una menor saturación con oxígeno en Morococha, donde esta substancia está sólo saturada en un 80 % aproximadamente, mientras que en Lima esta cifra alcanza a un valor medio de 96—98 %. Esta característica tiene interés para el antropólogo, pues determina variaciones en el aspecto externo de los individuos. La hemoglobina cuando está casi totalmente saturada con oxígeno, tiene un color rojo; en cambio, cuando la cantidad de gas es menor, el color es azulado. El hombre de Morococha presenta un aspecto congestivo, por dilatación de su red vascular cutánea en virtud del gran aumento de sangre circulante y, al mismo tiempo, tiene un tinte azulado en su cara, especialmente en las mejillas, debido al color de la hemoglobina circulante.

Existen también diferencias en las características de la hemoglobina circulante, entre el hombre de Lima y el de Morococha. Es sabido que la sangre, puesta experimentalmente en contacto con oxígeno, capta cierta cantidad de este gas en relación con su presión parcial. La cantidad de oxígeno que se combina con hemoglobina a determinada presión de oxígeno, expresa la afinidad de esa substancia por este gas. En estudios que hemos realizado con los doctores Aste-Salazar y Velásquez hemos comprobado que la afinidad de la hemoglobina por oxígeno está ligera pero definitivamente disminuida en el hombre de Morococha. Es decir, la curva de disociación está desviada a la derecha. Esto es posiblemente un proceso adaptativo, pues la menor afinidad facilita el suministro de oxígeno a los tejidos.

Equilibrio ácido-básico.—El hombre de Morococha exhibe en su sangre arterial una mayor tensión de anhídrido carbónico (6CO_2) y, en consecuencia, una menor cantidad de ácido carbónico. Como compensación está reducido proporcionalmente el contenido de bicarbonato, de tal manera que el pH se mantiene entre límites nor-

males. Corresponde este estado, en cierto grado, a una alcalosis compensada.

Aparato cardio-vascular.—Rotta, en esta reunión, nos ha manifestado que el corazón del nativo de la altura tiene un mayor tamaño, y que esto se debe a cambios en la parte derecha de este órgano. Este investigador, y también Monge, Arnáez y Peñaloza, han encontrado interesantes modificaciones en el trazo electrocardiográfico, las que al parecer están relacionadas con hipertrofia derecha.

Se ha demostrado también que la cantidad de sangre que pone en movimiento el corazón por minuto de tiempo es igual en la costa y en la altura. La presión arterial periférica tiende a ser más baja en los habitantes de Morococha comparados con los que viven en Lima. Posiblemente se deba esto a una menor resistencia periférica por dilatación vascular.

Actividad física.—Sería incompleta la descripción del hombre de Morococha si nos referimos únicamente a sus características en estado de reposo. El reposo es una condición algo artificial y ficticia en fisiología. La vida es un continuo movimiento y la normalidad de un hombre debe también medirse por su grado de tolerancia a la actividad física. En consecuencia, tiene un elevado interés el señalar la manera cómo el nativo de Morococha soporta las mayores demandas del trabajo muscular en el medio ambiente en que vive. Es frecuente observar en Morococha a los nativos jugando largos períodos de foot-ball. De igual manera desarrollan un trabajo intenso en sus actividades ocupacionales en las minas. En colaboración con varios de nuestros asociados hemos investigado detenidamente al nativo de Morococha durante períodos de actividad controlada. El ejercicio ha sido llevado a cabo en ergómetros a faja, caminando o corriendo a velocidades y gradientes conocidos, de tal manera que ha sido posible calcular el trabajo efectuado, conociendo también el peso del individuo. El trabajo realizado ha sido moderado y exhaustivo, éste último hasta el agotamiento. Idénticos estudios comparativos han sido hechos en Lima. Los resultados han sido interesantes. En general, el hombre de Morococha ha soportado períodos más largos de trabajo y los ha realizado con un menor consumo de oxígeno en relación a su peso corporal, es decir, con mayor eficiencia.

Además, hemos encontrado otra característica de elevado significado. Los músculos cuando se contraen en un medio de defi-

ciente oxígeno, producen ácido láctico, substancia que pasa a la sangre produciendo una condición de acidosis, la que es uno de los factores que contribuyen al desarrollo de fatiga. Hemos observado que en idénticos grados de trabajo muscular, el hombre de Morococha produce menor cantidad de ácido láctico que el hombre de Lima. Esto a primera vista es paradójico puesto que las dificultades en el suministro de oxígeno en la altura hacen pensar que en este medio ambiente la cantidad de ácido láctico producida durante la actividad física debe ser mayor. Pero, en cambio, es definitivamente menor. Este hallazgo sugiere procesos de adaptación a nivel tisular y nos ha llevado a pensar que los procesos fundamentales de adaptación a la altura se encuentran a nivel tisular. A este respecto, podemos mencionar que algunos estudios han revelado un aumento en la hemoglobina muscular. Otras investigaciones han dado resultados contradictorios.

Como lo ha manifestado el Dr. Monge, el objetivo de esta reunión no es únicamente el de presentar resultados. Es también el de provocar una discusión sobre los datos reunidos y plantear ciertas interrogaciones. Podemos intentar algunas.

a).—Es evidente que el nativo indígena, residente en la altura, presenta ciertas características físicas y fisiológicas que lo diferencian del hombre que vive al nivel del mar. Podemos preguntarnos: ¿Son estas características impuestas por el medio ambiente? La respuesta es al parecer positiva. Si hacemos que un sujeto que vive en la altura baje a la costa, desaparecen la mayor parte de estas características. Por ejemplo, la policitemia desaparece; su volumen pulmonar disminuye; el equilibrio ácido básico normal se restablece; el electrocardiograma modifica su forma. Han sido pues condiciones impuestas por el medio ambiente en que vivía el sujeto.

De otro lado, el hombre de la costa que sube a la altura, adquiere algunas de las características que se encuentran en los nativos. Las diferencias son más de carácter cuantitativo que cualitativo. Nuevamente vemos la influencia del medio ambiente.

b).—Hay otra interrogación que merece discusión. Este sujeto indígena, nativo de la altura, debe ser considerado como un sujeto aislado que representa la única raza que puede adaptarse con eficiencia a la altura? O puede otro individuo, procedente del llano, adquirir las mismas características y la misma eficiencia en este medio ambiente? Estas preguntas tienen una importancia bio-

lógica definida para poder explicar ciertos hechos. Creo que podrían considerarse desde puntos de vista principista y real. No hay duda que el nativo de la altura es el hombre mejor aclimatado a este medio ambiente. Así lo demuestra su vida normal y su excepcional rendimiento físico. Pero, obedece este hecho a la existencia de caracteres raciales propios que no pueden estar presentes en ningún otro sujeto? No lo creamos, aunque podemos equivocarnos totalmente. Quizá hay dos factores que explicarían su aclimatación casi perfecta. Son el tiempo de exposición y la constante actividad física. Este individuo ha nacido y desarrollado en este medio ambiente, desde la vida uterina hasta la edad adulta. Por consiguiente, ha tenido la posibilidad de desarrollar en un tiempo prolongado los mecanismos adaptativos a la anoxia crónica. De otro lado, la actividad física constante a que está sometido, en su vida diaria y en sus ocupaciones, es posiblemente un factor importante en el desarrollo de la aclimatación. En la actualidad estamos estudiando un grupo de individuos procedentes de la costa, y subidos a Morococha donde han permanecido por un tiempo prolongado. Hemos observado que aquellos con mayor actividad física son lo que más se aproximan a los nativos en su grado de aclimatación. Creemos pues, que si un sujeto de otra raza es llevado a la altura y permanece ahí, las futuras generaciones pueden adquirir igual grado de aclimatación.