

Vargas Enrique

1986

1986

514.

517



1100

CAPITULO X

GASES EN SANGRE

HEMATOSIS

Introducción.— La Hematosis constituye una importante etapa fisiológica en el curso de la cual se efectúan los intercambios gaseosos entre la sangre que llega por los capilares pulmonares y el medio gaseoso intra—alveolar, es decir la difusión del oxígeno (O_2) y del anhídrido carbónico (CO_2) a través de la membrana alveolo—capilar.

Como quiera que los procesos de aclimatación y adaptación a la vida en altura suponen una participación directa del sistema respiratorio, el conocimiento de los parámetros que brinda la gasometría arterial es imprescindible para comprender los fenómenos relacionados con las variaciones fisiológicas que los seres vivientes experimentan como consecuencia de su exposición al ambiente hipóxico de altitudes superiores a los 1.000 mts. (5) (?)

Por otra parte, el manejo de los parámetros hemorespiratorios facilita al clínico una mejor conclusión diagnóstica, así como un seguimiento evidente del tratamiento instaurado, es indudable el beneficio de su conocimiento especialmente por su estrecha relación con la patología cardiorrespiratoria y la implicación que supone el fenómeno ambiental (?).

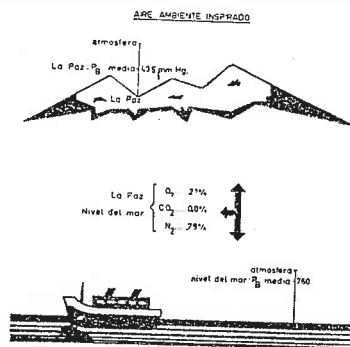
Principios generales.— El aire ambiente, a todo nivel de altura, tiene una misma concentración de nitrógeno ($N_2 = 79\%$) y de oxígeno ($O_2 = 20.93\%$). Los cambios en la presión de oxígeno inspirado (PIO_2) son una consecuencia directa de las variaciones de la presión barométrica.

Cuando una mezcla gaseosa (aire inspirado) está en contacto con un medio líquido (sangre capilar), la absorción es independiente para cada gas de la mezcla y depende directamente de la presión parcial del mismo (Ley de Dalton).

Consiguientemente, si colocamos en un recipiente cerrado una cierta cantidad de líquido, estando el resto del volumen ocupado por una mezcla gaseosa conocida (por ejemplo: aire ambiente), se establece un equilibrio entre el gas y el líquido con intercambio de moléculas gaseosas,

de tal manera que existe la misma presión para un mismo gas en ambas fases. (Ley de Henry).

Las variaciones de la presión de oxígeno del aire ambiente (PIO_2) dependen de las variaciones de la presión barométrica; en el caso de las variaciones de la PO_2 en zonas altas su dependencia viene a ser directa teniendo en cuenta que la concentración de oxígeno (20.93%) es la misma a nivel del mar y en la altura (IBBA) (Fig. 1).



De ésta manera, si la presión barométrica es de 760 mm. Hg (nivel del mar), podemos calcular la PO_2 del aire ambiente o presión de inspiración (PIO_2) en la siguiente forma:

$$PIO_2 = \frac{760 \times 20.93}{100} = 159 \text{ mm Hg}$$

En igual forma se puede calcular la presión de oxígeno del aire ambiente para la altura de La Paz (3.600 mts.), teniendo en cuenta la presión barométrica media que es de 495 mm. Hg:

$$PIO_2 = \frac{495 \times 20.93}{100} = 103.6 \text{ mm Hg}$$

A partir de ésta presión inspiratoria de O_2 del aire ambiente se establece un gradiente de presión en el sistema respiratorio humano, la mayor presión de O_2 corresponde a las vías aéreas superiores, le siguen en orden decreciente la presión alveolar (PAO_2), la presión arterial (PaO_2), y finalmente la presión a nivel de los capilares tisulares que regulará la entrega de O_2 a las células.

Gasometría en sangre arterial — Parámetros principales.— Un examen de gasometría arterial brinda la posibilidad de estudiar una serie de parámetros, los unos obtenidos directamente mediante analizadores específicos, los otros deducidos a partir de los primeros gracias a tablas y nomogramas especiales.

A continuación se detallan los principales parámetros y sus valores normales correspondientes a nivel del mar y para la altura de la ciudad de La Paz (Tabla I).

T A B L A 1

P A R A M E T R O		Nivel del mar	La Paz (3600 m.)
pH ó	Concentración de hidrogeniones (H ⁺)	7.40 ó 39.8 nanomoles	7.40 ó 39.8 nanomoles
PaO ₂	Presión arterial de O ₂	95 mm.Hg.	60 mm.Hg.
PaCO ₂	Presión arterial de CO ₂	40 mm. Hg.	30 mm. Hg.
SaO ₂	Saturación oxihemoglobínica arterial	96 %	90 %
CO ₃ H ⁻	Concentración de bicarbonatos	25 mEq l	19 mEq l
CaO ₂	Contenido de O ₂ en sangre arterial	20 vol. %	21 vol. %
CaCO ₂	Contenido de CO ₂ en sangre arterial	± 5	21 mMol l
BE	Exceso o déficit de bases	26 mMol l	± 5
Hb	Hemoglobina	15 gr. %	17 gr. %

TABLA I.— Muestra los valores normales de los parámetros de gasometría arterial, tanto a nivel del mar como en La Paz.

En el caso del pH, cuyos valores son idénticos a nivel del mar y en la altura, consignamos al mismo tiempo sus valores equivalentes en nanomoles por litro (n/Mol/l), unidad que en muchos casos reemplaza al pH, especialmente en aquellos en los que debe hacer una representación estadística.

Al final se muestran los valores normales de la hemoglobina, elemento importante cuando se calculan indirectamente algunos valores del equilibrio ácido—básico especialmente el exceso o déficit de bases, parámetro muy útil en terapia intensiva.

Medida del pH sanguíneo y sus aplicaciones.— La medida del pH sanguíneo, procedimiento tecnológico muy utilizado en el estudio de los mecanismos de intercambio gaseoso e iónico, es probablemente el mejor ejemplo de desarrollo técnico en materia de combinación de potenciales de acción generados por iones disueltos y su detección mediante electrodos de fina construcción.

Las técnicas electrométricas permiten obtener medidas del pH con bastante precisión, están basadas en las variaciones eléctricas cuya inten-

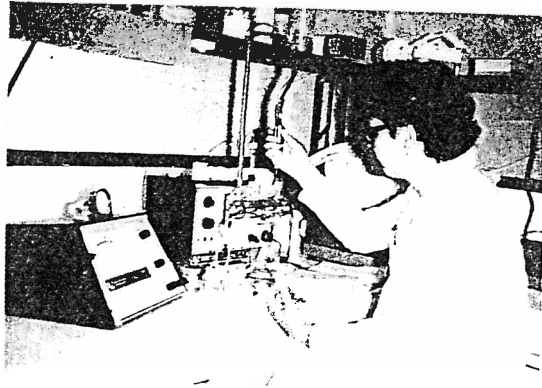
sidad es captada en los bornes de electrodos sumergidos en una solución y donde se producen las reacciones en función de la concentración de hidrogeniones.

El método exige aparatos electrónicos de calidad con electrodos de vidrio de extrema sensibilidad, su calibración requiere de soluciones tampón a pH estable de preparación rigurosa.

Para una descripción práctica tomaremos como ejemplo un aparato conocido en nuestro medio: el analizador IL METER construido en diferentes modelos, pero con los mismos principios físicos y electrónicos.

Es un aparato construido para medidas no continuas del pH en sangre total, es suficiente una muestra de 0.5 ml, la cadena electrónica está constituida, en lo que se refiere al pH, por un microelectrodo cuya solución interna tiene un pH constante y de un amplificador a lectura directa.

El conjunto del modelo más simple (IL 113) comporta además, los elementos necesarios para las determinaciones de PO₂ y PCO₂ en muestras sanguíneas, líquido cefalorraquídeo y otros. (fig. 2).



En la determinación del pH, el **electrodo de vidrio** es polarizable, plata—cloruro de plata, y está constituido de un recipiente cerrado de contenido electrolítico con un capilar interior que permite la llegada de la muestra y su lavado posterior, requiere un volumen de sangre limitado (Fig. 3).

Externamente el electrodo está recubierto de un film aislante de pintura plateada. En cambio el **electrodo de referencia** (Fig. 3) es de calomel, debe estar bañado constantemente en cloruro de potasio (KCl) saturado, el conjunto presenta 2 orificios:

- Un orificio de lleno, en la parte superior del electrodo, cerrado por un tapón de goma.
- Un orificio inferior, con un tapón de cerámica porosa que permite el contacto con la solución eléctrica intermedia entre

ambos electrodos (vidrio y referencia), ésta solución es sobre saturada en KCl; el tapón permite el paso de la corriente eléctrica, impidiendo la contaminación de las soluciones.

Ambos electrodos se encuentran sumergidos en un baño termoes- table (Fig. 3 — centro). El electrodo de calomel proporciona un voltaje constante de referencia, estable con relación a las variaciones que aparecen a nivel de la membrana de vidrio.

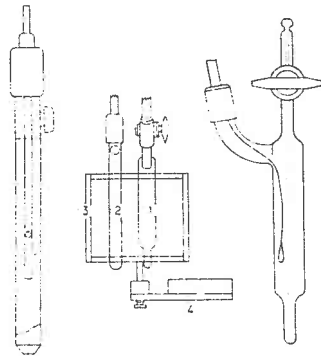


Fig. 3.— Electrodos para la medida del pH.
— A la derecha: Electrodo de vidrio (1)
— A la izquierda: Electrodo de referencia (2)
— Al centro: Disposición del sistema (3 y 4)

Protocolo de medida.— En principio, consiste en establecer a través de una fina membrana de vidrio, un potencial proporcional a la diferencia de pH de las 2 soluciones separadas por esta membrana:

- La solución de pH constante está situada dentro del electrodo alrededor del capilar.
- La muestra de sangre de pH desconocido es introducida a través del capilar.

Calibración.— Esta fase tiende a conseguir una adaptación de las tensiones de salida real y técnica del electrodo de vidrio; por esta razón se aconseja la recalibración semanal con las correcciones pertinentes en cada respuesta.

- 1º— Colocar el botón de control de temperatura del panel al mismo valor que indica el termómetro del baño termoes- table (37°C).
- 2º— Llenar el reservorio inferior con los cristales en solución de KCl.
- 3º— Controlar el nivel de la saturación de KCl en el electrodo de calomel.

- 4°— Enjuagar el capilar del electrodo de vidrio con suero fisiológico.
- 5°— Llenarlo con la solución tampón a pH 6.84 (marca de fábrica).
- 6°— Sumergir el electrodo en la solución con KCl a fin de crear el punto de contacto entre ambos electrodos.
- 7°— Situar el selector del panel de control en "pH" con el botón "pH balance" corregir la lectura hasta que la aguja llegue al punto 6.84 marcado en el cuadrante del galvanómetro por una pequeña flecha.
- 8°— Separar el contacto de electrodos, vaciar su contenido en solución tampón, enjuagar con suero fisiológico el capilar.
- 9°— Llenar el capilar con la solución tampón a pH 7.384 (marca de fábrica).
- 10°— Poner en contacto los electrodos a través de la solución de KCl
- 11°— Corregir la situación de la aguja hasta 7.384, punto marcado por otra pequeña flecha, usando el botón "pH slope". Bloquear el botón.

De esta manera la calibración está hecha, una maniobra es suficiente para cada medida.

Una vez lavado el capilar mediante aspiración de suero fisiológico, el aparato está listo para recibir la muestra de sangre y determinar su pH. Es necesario recordar la necesidad de lavar con suero fisiológico el capilar del electrodo de vidrio para evitar el peligro de coagulación interior.

Medida de las presiones parciales de O₂ y CO₂.— De acuerdo con las leyes físicas y las diferencias de presiones parciales de O₂, que existen entre el alvéolo y los tejidos, el oxígeno va a difundir de las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión; las modalidades y los efectos de ésta difusión van a ser potencializados por una serie de factores que concurrirán todos a una mejor fijación o mayor liberación de éste gas a nivel tisular.

Tres etapas se producen en las zonas de intercambio de oxígeno:

- La difusión alveolo capilar.
- La disolución en la sangre capilar.
- El transporte por la hemoglobina hasta los tejidos.

El anhídrido carbónico (CO₂) tiene un trayecto inverso; liberado por el metabolismo a los mismos principios fundamentales y a las mismas leyes de los gases que el oxígeno. Igualmente se produce una difusión des-

de los tejidos hacia la sangre, atravesando el tejido intersticial; se solubiliza en la sangre venosa y es transportado al igual que el oxígeno al estado disuelto y combinado a la hemoglobina. Pero un concepto importante para las medidas laboratoriales: su comportamiento en el medio ionizado está a cargo de una enzima, la anhidrasa carbónica intraglobular que catalizará su transformación en bicarbonato con la consiguiente repercusión sobre el equilibrio ácido básico. (4).

Es importante recordar que la difusión del O_2 hacia los capilares pulmonares y del CO_2 en sentido inverso se produce gracias a los gradientes de difusión existentes en uno y otro lado de la membrana alveolo—capilar, el gradiente o diferencia alveolo—arterial del O_2 (DA—a CO_2 — 3 a 5 mm. Hg) que difunde hacia el alveolo y requiere una menor tensión debido a su mayor difusibilidad. (5).

Se ha descrito un aumento compensatorio de la ventilación en regiones altas, este hecho fisiológico facilita un mejor y más rápido equilibrio entre las fases gaseosa y líquida determinando una disminución del gradiente alveolo capilar para el O_2 . (2).

La hemoglobina representa el vehículo de transporte de la mayor parte, tanto del O_2 como del CO_2 , la forma combinada con el O_2 recibe el nombre de oxihemoglobina, el parámetro laboratorial que nos permite apreciar el transporte del O_2 en ésta forma es la saturación arterial de oxígeno o SaO_2 , la curva de disociación de la hemoglobina que tiene una forma sigmoide depende directamente de la PaO_2 , es decir que a mayor presión arterial de O_2 mejor saturación oxihemoglobínica, sin embargo la influencia del pH, de la $PaCO_2$ (Efecto Bohr) y de la temperatura sobre las desviaciones de la curva hacia la izquierda o hacia la derecha tienen mucha importancia. (Fig. 4). Se han realizado numerosos estudios sobre su significación en los procesos de adaptación a la vida en altura y se ha comprobado que una desviación de la curva de disociación de la oxihemoglobina hacia la derecha facilitarí la liberación de O_2 a nivel tisular aumentando efectivamente el aporte a las células en período de aclimatación, el principal componente responsable de este fenómeno es el 2—3 difosfoglicerato. (3) (1) (6).

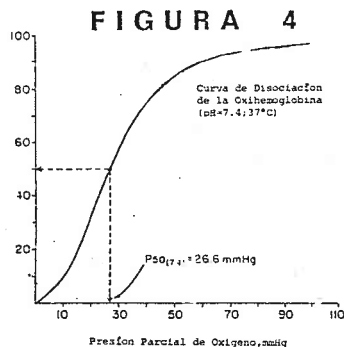


Fig. 4.— Curva de Disociación de la Oxihemoglobina

Protocolo de medida de la PaO₂.— La medida de la presión parcial de oxígeno puede ser realizada por un proceso electrónico, el mismo está basado en el principio de polarografía derivado de las leyes de electrolisis.

El electrodo para la medida propiamente dicha está construido en platino y juega el rol de cátodo, se encuentra insertado en un tubo de vidrio sobre el cual se encuentra fijo un hilo de plata que hace las veces de ánodo, el conjunto está contenido en un recipiente electrolítico, separado de la muestra de sangre de la cámara de medida, por una membrana semipermeable de teflón, la cual sólo es permeable al O₂.

El principio está basado en que este electrodo está sometido a una tensión de polarización aplicada al cátodo de platino, de tal forma que permita obtener una corriente límite de polarización, para la cual toda variación de intensidad es función de la corriente de reducción de oxígeno. Esta corriente límite expresa la fuerza de difusión de los iones la que a su vez es proporcional a la concentración de oxígeno de la solución.

El sistema está conectado a un amplificador donde los intercambios químicos son transformados en fenómenos eléctricos amplificados los mismos que son visualizados en un galvanómetro que indica las variaciones de la PaO₂ sobre un cuadrante.

En el sistema IL Meter, el electrodo se encuentra en una cámara especial termoestabilizada a 37°C.

La calibración se realiza de la siguiente forma: obtener el punto cero, haciendo pasar una cantidad de gas de nitrógeno puro o de helio puro, regulando poco a poco el cero en el panel mediante el botón respectivo controlando con la lectura del cuadrante. En seguida, calibrar el "punto alto" con una mezcla gaseosa que contenga 12% de oxígeno, también puede utilizarse el aire ambiente a condición de tener en cuenta que las variaciones en la concentración de O₂ dependerán de los cambios de la presión barométrica del día.

Una vez terminada la calibración se pueden pasar las muestras de sangre, es importante que ellas hayan sido obtenidas en una jeringa estéril con 0.2 ml de heparina y en condiciones anaeróbicas rigurosas.

Las muestras de sangre pueden ser de pacientes que respiran aire ambiente o bien mezclas especiales con el objeto de estudios determinados, por ejemplo: muestras en hiperoxia (O₂ puro) durante 10' para poder detectar un efecto shunt o shunt verdaderos a nivel alveolo capilar.

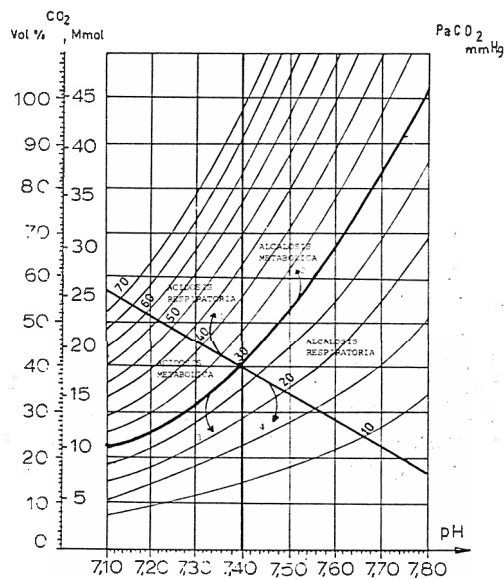
Determinación de la presión parcial de anhídrido carbónico.— La determinación de la presión parcial de anhídrido carbónico sanguíneo puede ser realizada directamente a partir de métodos electrónicos, los métodos indirectos, menos precisos, suponen la utilización de nomogramas.

La determinación directa está basada en la utilización de electrodos de vidrio con membrana de teflón. El principio se basa en el mecanismo de difusión del anhídrido carbónico en una solución de bicarbonato cuyo pH

varía en función de la concentración del gas. La membrana utilizada es permeable únicamente al CO_2 ; el electrodo de vidrio mide únicamente la variación de concentración en iones H^+ .

La determinación propiamente dicha depende de una calibración del electrodo a membrana, que se encuentra en una cámara termoestabilizada (37°C) con mezclas gaseosas humidificadas y cuya concentración en CO_2 es bien conocida. El potencial, obtenido por la muestra, y que se manifiesta por una variación de corriente es directamente leído en el cuadrante del galvanómetro y su valor representa la PaCO_2 del paciente.

Nomogramas de cálculo indirecto.— Los nomogramas usados en laboratorio tienen la ventaja de permitir el cálculo indirecto de parámetros cuya medida es difícil en condiciones normales. Para realizar éste cálculo se deben conocer por lo menos otros 2 parámetros cuyos valores se harán coincidir sobre el nomograma, por ejemplo: a partir de las cifras de pH y PaCO_2 se obtiene la concentración de bicarbonatos en el nomograma de Davenport. (Fig. 5).



Las variaciones en función de la altura, particularmente de los valores de pH, PaCO_2 no limitan el uso de nomogramas, el margen de error puede ser mínimo si se conocen los valores normales.

Otra ventaja de los nomogramas es la representación gráfica de los cuadros patológicos mediante puntos sucesivos de acuerdo a la evolución clínica del paciente.

El nomograma de Siggerd—Andersen es uno de los más conocidos y prácticos (Fig. 6).

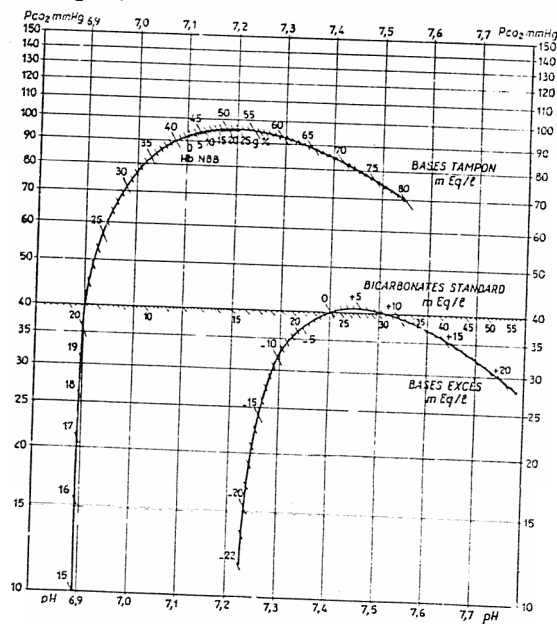


Fig. 6. Nomograma de Siggaard—Andersen.

Los valores de pH están situados en abscisas, es decir sobre la línea horizontal, mientras que la PaCO₂ se representa en ordenadas o línea vertical. Los valores de los bicarbonatos calculados se sitúan en una línea media horizontal paralela al eje de pH, en éste nomograma igualmente se deberá tener cuidado de aplicar los valores normales para la altura, especialmente en el cálculo indirecto del exceso o déficit de bases y las bases tampón, pues justamente son los parámetros utilizados en la corrección de los cuadros patológicos, procedimiento que muchas veces es de urgencia.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — Aste Salazar H., Hurtado A. — The affinity of hemoglobin for oxygen at sea level and at high altitude. *Am. J. Physiol.* 142:733 1944.
- 2 — Coudert J. Paz Zamora M., Vargas E., Ergueta J., Gutiérrez N., Haftel W. — Aclimatación de los nativos de grandes alturas a bajas altitudes. *Anuario I.B.B.A.*, 1979.
- 3 — Chanutin A., Curnish R., — Effect of organic and inorganic phosphate on the O₂ equilibrium of human erythrocytes. *Arch. Biochem.* 121:96, 1967.

- 4 — Davenport H.W. — ABC de l'équilibre biochimique Acido Basique Masson y Cie. — Paris 1965.
- 5 — Lefrançois R., Vargas E., Hellot M.F., Pasquis P. and Denis Ph. — The regulation of Respiration during sleep and anesthesia. Plenum Press New York 1977.
- 6 — Lenfant C., Torrance J., English E., Finch C., Reynafaye C., Ramos J., Faura J — Effect of Altitude on oxygen binding by hemoglobin and on organic phosphate levels. J. Clin. Invest. 47:2652 1968.
- 7 — Vargás Pacheco E., — Características respiratorias de los nativos de altura. Revista IBBA N° 12 — Oct. 1970.
- 8 — Vargas P. Enrique, Paz Zamora M., Ergueta Jorge, Pinto Enrique, Medeiros Santiago. — Obesidad y eritrocitosis 1971 — Anuario IBBA, 47—51.
- 9 — West John B. — Respiratory physiology. The essentials — Waverly Press, Inc. 1974.

CS-2540Y