

Gasometría arterial

ROBERTO RODRÍGUEZ-ROISÍN

ALVAR AGUSTÍ GARCÍA-NAVARRO

FELIP BURGOS RINCÓN

PERE CASAN CLARÀ

MIGUEL PERPINÀ TORDERA

LEOPOLDO SÁNCHEZ AGUDO

VICTOR SOBRADILLO PEÑA

Comentario del coordinador

Tras las dos normativas anteriores dedicadas a la espirometría forzada y a las pruebas de broncoprovocación inespecífica, ésta es la tercera publicación de la serie “Recomendaciones SEPAR” que también versa sobre los aspectos esenciales de una metodología destinada al estudio e interpretación del estado de la función pulmonar. El objetivo fundamental de la misma es proporcionar la máxima información posible en torno a la medición de los gases arteriales, desde su obtención en la cabecera de la cama del enfermo hasta su procesamiento final a nivel instrumental. De ahí que se insista sobre una larga lista de normas y detalles prácticos, sin olvidar los errores de medición ni toda aquella otra información complementaria que nos ha parecido conveniente incluir. Sin embargo, otro objetivo primordial ha sido llamar la atención, de forma indirecta, sobre la importancia actual que tiene la medición correcta de los gases arteriales en la clínica, a fin de mejorar el tratamiento y cuidado de los pacientes con problemas respiratorios.

Sin desmerecer ni minimizar en absoluto el interés y utilidad de otras pruebas funcionales pulmonares sólidamente implantadas entre los neumólogos, como por ejemplo la espirometría, parece prudente recordar que la práctica de la gasometría arterial representa la prueba que más rápida y eficazmente puede informar sobre el estado global de la función primaria del aparato respiratorio; esto es, *el aporte de oxígeno al organismo y la eliminación del anhídrido carbónico del mismo*. Es más, la gran expansión que ha adquirido la oxigenoterapia durante los últimos tiempos, en sus diversas facetas y modalidades, ha resaltado y consolidado aún más la incorporación de esta técnica como instrumento de trabajo indispensable para la labor clínica, sin la cual difícilmente puede optimizarse la atención a los pacientes neumológicos. No está de más insistir nuevamente en que el concepto de insuficiencia respiratoria, situación clínica cuya elevada morbilidad y mortalidad conlleva unos costes sociales y económicos impresionantes, descansa exclusivamente en la medición de la presión parcial de los gases fisiológicos en sangre arterial.

El grupo de trabajo ha entendido, desde el principio mismo de su actuación, que, por más específica o extraña que resulte la tarea asistencial de un especialista en neumología, muy difícilmente podrá sustraerse al conocimiento de esta prueba de laboratorio e ignorar los aspectos esenciales de su aplicación. Tal vez sea ésta una de las técnicas más convencionales de análisis de la función pulmonar cuyos errores de medición e interpretación redundan en un mayor y más inmediato perjuicio, a veces incluso gravemente irreversible para el paciente. Sin embargo, también se debe ser consciente de que las limitaciones metodológicas son aún notorias. En los años venideros seremos testigos de importantes avances en este campo que, por un lado, simplificarán algunos de los aspectos actuales más engorrosos y, por otro, subsanarán errores instrumentales frecuentes. En este sentido, por ejemplo, aún se está lejos de una óptima estandarización en la recogida de las muestras, su medición y el manejo de los aparatos.

Esta normativa pretendería ser también de utilidad práctica para todos aquellos otros colectivos médicos (anestesiólogos, cardiólogos, cirujanos cardiotorácicos, intensivistas e internistas generales) que, al igual que los neumólogos, pueden estar comprometidos en el cuidado y tratamiento de pacientes con problemas de insuficiencia respiratoria. A todos ellos mi agradecimiento.

R. Rodríguez-Roisín

Medición. Fundamentos teóricos

Electrodo de pH

El valor de pH equivale a la concentración de hidrogeniones $[H^+]$ existente en sangre. Expresa numéricamente su mayor o menor grado de acidez. En el individuo sano, oscila entre 7,35 y 7,45. Carece de unidades aunque, matemáticamente, corresponde a $-\log_{10} aH^+$, donde a equivale a la actividad molar relativa. Se cuantifica mediante un electrodo especial compuesto por dos compartimientos independientes¹. El primero de ellos, la cámara de medición, tiene una membrana de vidrio únicamente permeable para los H^+ . La segunda contiene un electrodo de referencia estable, generalmente de mercurio (calomel). Un puente electrolítico de cloruro potásico conecta ambos compartimientos. El potencial eléctrico generado por los H^+ , que pasan a través de la membrana y alcanzan el electrodo de mercurio, es función logarítmica de la concentración real de H^+ (pH) de la muestra sanguínea. Dado que la permeabilidad de la membrana es un factor de gran importancia técnica y que el paso del tiempo y el depósito de proteínas pueden alterarla significativamente, debe comprobarse su estado de forma periódica (véase el apartado “Mantenimiento” incluido en “Electrodo de pH” [Medición. Fundamentos teóricos]).

Electrodo de PO_2

El valor de presión parcial de O_2 en sangre (PO_2) corresponde a la presión ejercida por el O_2 que se halla disuelto en el plasma. No debe confundirse con la cantidad que se halla unida a la hemoglobina en combinación química reversi-

Abreviaturas utilizadas en esta normativa

A	Alveolar
a	Arterial (sangre)
Aa PO_2	Gradiente (o diferencia) alveoloarterial de O_2 (mmHg)
Ca O_2	Contenido arterial de O_2 (vols%)
Cv O_2	Contenido de O_2 en sangre venosa mixta (vols%)
CO $_2$	Anhidrido carbónico
FIO $_2$	Fracción inspiratoria de O_2 (%)
I	Inspiratorio
O $_2$	Oxígeno
PaO $_2$	Presión parcial arterial de O_2 (mmHg)
PaCO $_2$	Presión parcial arterial de CO $_2$ (mmHg)
P $_{50}$	PO $_2$ que produce SO $_2$ del 50% (mmHg)
Qs/Qt*	Cociente de mezcla venosa (%)
R	Cociente respiratorio (%)
SO $_2$ %	Saturación de oxihemoglobina (%)
v	Venosa mixta (sangre)
VD/VT	Espacio muerto funcional (%)
VCO $_2$	Producción de CO $_2$ (ml/min)
VO $_2$	Consumo de O_2 (ml/min)

* Si se mide con FIO $_2$ de 1, equivale a *shunt*.

ble, (véase el apartado “Saturación de oxihemoglobina” incluido en “Medición. Fundamentos teóricos”) o a la cantidad total existente o contenido de oxígeno. Suele expresarse en mmHg o unidades torr, aunque la nomenclatura europea ha optado por el término kilopascal (kPa) del Sistema Internacional de Unidades (SI) ($1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = 0,133 \text{ kPa}$; $1 \text{ kPa} = 7,5006 \text{ mmHg}$ o torr). En el individuo sano su valor disminuye progresivamente con la edad, pero, respirando aire ambiente y a nivel del mar, siempre debe ser superior a 80 mmHg. Se cuantifica con el electrodo de Clark², formado por un cátodo de platino y un ánodo de cloruro argéntico unidos mediante puente electrolítico de cloruro potásico y con voltaje polarizante de 0,5-0,6 voltios. Además, existe una membrana especial que permite el libre paso de O_2 , pero evita el depósito de proteínas en el electrodo de platino. El principio básico de funcionamiento depende de la difusión de las moléculas de O_2 a través de la solución electrolítica hacia la superficie del cátodo, donde se reduce alterando la conductividad de dicha solución electrolítica. Este último fenómeno comporta un cambio en la intensidad de corriente existente entre el cátodo y el ánodo, que es directamente proporcional al valor de PO_2 existente en la muestra sanguínea. Existen diversos compuestos capaces de modificar tal relación; entre ellos destaca el halotano por su frecuente empleo en anestesiología.

Electrodo de PCO_2

La presión parcial de CO_2 (PCO_2) corresponde a la presión ejercida por el CO_2 libre en plasma. Se expresa en las mismas unidades que la PO_2 (mmHg, torr o kPa [véase el apartado anterior]). En el individuo sano su valor oscila entre 35 y 45 mmHg y, a diferencia de la PO_2 , no varía con la edad. Para su cuantificación se emplea el electrodo de Stow-Severinghaus¹, que consiste en un electrodo de pH estándar (véase el apartado “Electrodo de pH” incluido en “Medición. Fundamentos teóricos”) sumergido en una solución tamponada de bicarbonato sódico y separado de la muestra sanguínea por una membrana que únicamente permite el paso de CO_2 . La difusión del CO_2 desde la sangre hasta la solución tamponada de bicarbonato supone el equilibrio de la PCO_2 de ambos medios; el resultado es un cambio proporcional en la concentración de H^+ de la solución tamponada que es detectado por el electrodo de pH. Como en el caso de O_2 , si se modifica la permeabilidad de la membrana se altera significativamente el tiempo de respuesta del electrodo y, por consiguiente, la exactitud de la medición de la PCO_2 . Es imperativo, por tanto un mantenimiento periódico y regular del electrodo (véase el apartado “Mantenimiento” incluido en “Electrodo de PCO_2 ” [“Control de calidad y mantenimiento”]).

Saturación de oxihemoglobina

El valor de saturación de oxihemoglobina ($SO_2\%$) corresponde al porcentaje de hemoglobina que se halla unida reversiblemente al O_2 . Respirando aire ambiente y a nivel del mar, en un individuo sano, debe ser superior al 90%. La observa-

ción clínica de que la sangre arterial y venosa tiene un color diferente constituye la base para la medición espectrofotométrica de la $SO_2\%$. Esta técnica se basa en la emisión de uno o varios haces de luz de diferente longitud de onda que son recibidos por un amplificador que, a su vez, genera una corriente eléctrica de salida proporcional a la absorción de luz producida por sustancias de color diferente, generalmente oxi y desoxihemoglobina. Todo ello se realiza tras haber hemolizado la muestra sanguínea y haber abstraído la corriente generada por una sustancia cero de referencia. Cronológicamente, la medición de la $SO_2\%$ precedió a la cuantificación de la PO_2 . En 1900, se describió el primer sistema basado en la emisión de dos longitudes de onda diferentes. Dicho sistema era capaz de cuantificar la cantidad de oxihemoglobina en relación a la cantidad de hemoglobina reducida existente. Sin embargo, presenta el inconveniente de sobreestimar el porcentaje de la primera cuando coexisten concentraciones significativas de carboxi o metahemoglobina. Posteriormente se han desarrollado otros sistemas basados en la emisión simultánea de hasta seis longitudes de onda diferentes, capaces de cuantificar al mismo tiempo, los valores de oxi, desoxi, carboxi y metahemoglobina.

Debe señalarse, sin embargo, que el azul de metileno y el azul de Evans pueden detectar la sulfahemoglobina y hemoglobina fetal, absorber luz de una determinada longitud de onda y modificar la fiabilidad de los resultados.

Si no se dispone de un sistema automatizado de medición, el valor de $SO_2\%$ puede deducirse mediante el empleo del nomograma de Severinghaus³ o las subrutinas de cálculo propuestas por Kelman⁴.

P₅₀

El valor de la denominada P_{50} describe el grado de afinidad de la hemoglobina por el O_2 y se define como la cifra de PO_2 que corresponde a un valor de $SO_2\%$ del 50%, a 37 °C, con PCO_2 de 40 mmHg y pH de 7,4. La P_{50} del adulto sano oscila entre 26 y 28 mmHg. Su disminución implica un aumento de la afinidad de la hemoglobina por el O_2 y viceversa.

El método ideal para determinar la P_{50} comprende la tonometría (véase el apartado “Tonometría” incluido en “Electrodo de PO_2 ” [“Control de calidad y mantenimiento”]) de tres muestras de sangre con valores de $SO_2\%$ próximos al 50% (en general, se aconseja tonometrar a concentraciones de oxígeno del 3, 3,5 y 4%). Dentro de lo posible, debe procurarse que la PCO_2 se mantenga constante a 40 mmHg. Sin embargo, después de tonometrar la muestra sanguínea, es imprescindible comprobar los valores de PCO_2 , pH y exceso de base, con objeto de estandarizar los valores de PO_2 obtenidos a condiciones de referencia (pH = 7,4; PCO_2 = 40) (véase el apartado “Control de calidad y mantenimiento”). Tras ello, todos los puntos de $SO_2\%$ y PO_2 se situarán en un eje de coordenadas y el valor de P_{50} se extrapolará a partir de la recta que una estos tres puntos. Aunque menos precisos, existen sistemas automatizados que requieren menos experiencia y describen toda la curva de disociación de la oxihemoglobina; pueden efectuarse varios estudios en una hora, con resultados bastante aceptables.

Contenido de O₂

El contenido de O₂ corresponde a la cantidad total de O₂ existente en sangre por unidad de volumen y equivale a la suma de la cantidad disuelta en plasma (PO₂) y de la unida a la hemoglobina (SO₂%). Se expresa en volúmenes por cien (vols%) y, en el individuo sano, su valor en sangre arterial oscila alrededor de los 20 vols%. Debe diferenciarse entre contenido y capacidad de O₂. El primero de ellos equivale a la cantidad total de O₂ realmente existente en la muestra sanguínea, mientras que la segunda corresponde a la máxima cuantía posible. El cociente entre ambas es superponible, por tanto, al valor de SO₂%. Aunque conocidos los valores de PO₂, hemoglobina y SO₂%, el valor del contenido de O₂ es fácilmente deducible (apéndice 1) y existen dos técnicas capaces de cuantificarlo directamente.

Técnica de Van Slyke y Neill. El O₂ es liberado de la hemoglobina mediante la adición de una solución de ferricianida a un volumen de sangre conocido, en un recipiente cerrado y de volumen constante; el valor del contenido de O₂ corresponde a la disminución de presión que se produce tras la absorción química del O₂. Esta técnica, clásica, es muy precisa y exacta pero requiere gran experiencia previa y cerca de 20 min para su determinación. Por ello, se halla prácticamente en desuso.

Célula galvánica. Para la medición rutinaria del contenido de O₂ es mucho más apropiado el empleo de una célula galvánica fabricada únicamente por Lexington Industries (Lex-O₂-Con). Dicha célula emite un potencial de corriente directamente proporcional a la cantidad de O₂ que recibe después de que la muestra de sangre (tan sólo se requieren 20 µl) haya sido tratada mediante la adición de una muestra gaseosa con actividad catalítica (97% N₂, 2% H₂ y 1% CO), capaz de liberar el O₂ existente en la sangre y transferirlo a la célula galvánica propiamente dicha. Debido a su elevada afinidad para la hemoglobina, se emplea monóxido de carbono (CO) en la mezcla gaseosa para evitar que el O₂ liberado vuelva a reaccionar con la hemoglobina, lo que infraestimaría el valor real del contenido de O₂. Se ha referido que la exactitud y precisión de esta técnica es similar a la que proporciona la técnica de Van Slyke pero que su tiempo de análisis no supera los 6 min.

Muestras gaseosas. En general, la mayoría de aparatos medidores de gases en sangre también aceptan el empleo de muestras gaseosas. Sin embargo, en tales condiciones debe tenerse en cuenta que el electrodo de Clark consume O₂. Dicho consumo será de diferente cuantía si la muestra inyectada es gaseosa, sanguínea o solución acuosa tamponada, lo que explica las diferencias observadas en el resultado final cuando el mismo valor de PO₂ es cuantificado en medios diferentes. La magnitud del factor de corrección depende de varios elementos, que incluyen el grosor de la membrana del electrodo de Clark (véase el apartado "Electrodo de PO₂" incluido en "Medición. Fundamentos teóricos"), el material utilizado en la fabricación de dicha membrana, el diámetro del cátodo y las características de la relación presión-flujo de la muestra en las proximidades del cátodo. No obstante,

el creciente desarrollo tecnológico ha posibilitado la aparición de microelectrodos, de diámetro $.25 \mu\text{m}$, que ya están incorporados en la mayoría de nuevos aparatos, y con ello se ha reducido notablemente la cantidad de O_2 consumido por el antiguo electrodo de Clark y la necesidad de métodos de corrección complejos.

Control de calidad y mantenimiento

La exactitud y precisión de cualquier medida (entre ellas la de la gasometría arterial) dependen tanto de la cualificación y entrenamiento del personal técnico como de la calidad de los electrodos polarográficos y su correcto mantenimiento⁵. Debe efectuarse por tanto un estricto control de calidad, entendiéndose por tal la verificación de la exactitud del aparato de medición mediante la *comparación* de muestras-patrón de valor conocido con los resultados realmente obtenidos, comparar resultados entre diferentes aparatos y realizar un mantenimiento regular del utillaje. Debe diferenciarse del concepto de *calibración*^{6,7}, que consiste en *ajustar* el resultado de un instrumento determinado con un estándar conocido, al objeto de su exactitud. Finalmente, señalemos que el programa denominado *Proficiency testing*^{6,7} es un intento de efectuar un control de calidad multicéntrico que se ha llevado a cabo en EE.UU. Consiste en la medición periódica de muestras con valores desconocidos en diferentes laboratorios a fin de comparar y evaluar sus resultados. Constituye, por consiguiente, un excelente sistema de control de calidad. Sin embargo, dado que supone un gran esfuerzo organizativo y comporta un dispendio económico sustancial, existe controversia en cuanto a su recomendación y empleo rutinario⁸.

Asimismo, en todo laboratorio debe ser imprescindible un tonómetro y deben evitarse las muestras acuosas, que son poco recomendables. Es de destacar que el coste económico de un tonómetro, en contra de lo que habitualmente se cree, es inferior al que supone la utilización continuada de muestras acuosas.

Es recomendable mantener encendido el aparato para evitar prolongar el tiempo de calibración. Al iniciar las mediciones, siempre debe calibrarse con dos puntos de pH, PO_2 y PCO_2 . Es conveniente tener el registro de todas las gasometrías, para posibles consultas posteriores. Es indispensable tener junto a los aparatos una libreta de averías y otra de mantenimiento y calibraciones donde registrar todas las eventualidades, lo que permitirá un mejor control de calidad (apéndice 2).

Electrodo de pH

Calibración. El electrodo de pH es lineal, relativamente estable y fácil de calibrar. Su calibración incluye dos operaciones diferentes:

1. *Calibración de 1 punto.* La calibración de 1 punto con la solución tamponada de pH 7,384 debe realizarse antes del análisis de cada muestra.

2. *Calibración de 2 puntos.* Incluye el uso de dos soluciones tamponadas, generalmente de pH 7,384 y 6,846. La calibración de 2 puntos debe hacerse cada 4 horas o cuando la calibración de 1 punto esté alterada en $\pm 0,01$.

Mantenimiento

- *Diario*. Revisar el nivel de las dos soluciones tamponadas (pH 7,384 y 6,846). Evitar el depósito de proteínas en la membrana, para lo cual debe limpiarse utilizando una solución de un disolvente proteico especial.
- *Semanal*. Saturar el electrodo de referencia con cloruro potásico.
- *Mensual*. Renovar las soluciones tamponadas. Verificar con un pH-metro diferente la exactitud de las soluciones tamponadas. En todo caso debemos realizar el mantenimiento que cada fabricante establezca para sus equipos.

Electrodo de PO₂

Calibración. La calibración convencional del electrodo de PO₂ se lleva a cabo mediante el empleo de dos muestras gaseosas diferentes, cuyas concentraciones equivalen al 20 y 0% de O₂ (aproximadamente, corresponden a valores de PO₂ de 140 y 0 mmHg). Debe realizarse la *calibración de 1 punto* (20% O₂) antes de cada medición y la *calibración de 2 puntos* (20 y 0% O₂) cada 4 horas o cuando la de un punto exceda los valores esperados en ± 2 o 3 mmHg.

Debido a que la respuesta del electrodo de Clark puede llegar a ser hasta un 25% más baja cuando mide gas que cuando mide sangre², el electrodo de PO₂ es más inestable y difícil de calibrar que el de pH. Por ello, es imperativo efectuar un estricto control de calidad y comprobar lo correcto de la calibración mediante el uso de controles específicos, en general sangre tonometrada (véase apartado “Tonometría” en “Control de calidad y mantenimiento”) o soluciones acuosas tamponadas (véase apartado “Soluciones acuosas tamponadas” en “Control de calidad y mantenimiento”), aunque estas últimas son poco recomendables.

– *Tonometría*. La tonometría es el método por excelencia para la calibración y el control de calidad de la gasometría. Se basa en la equilibración de la presión parcial de un gas determinado entre una muestra de sangre y una muestra gaseosa. Se recomienda emplear la denominada tonometría en capa fina por requerir pequeñas cantidades de sangre y gas de calibración, así como por generar un mínimo de espuma⁹. La sangre que usemos para tonometría debe ser de extracción reciente (menos de 24 horas) y no debe presentar hemólisis, leucocitosis significativa (20.000 elementos/ μl^3) o concentraciones lipídicas altas. Además, con objeto de mantener unas mínimas medidas higienicoprofilácticas (véase “Medidas higiénicas y profilácticas”), no debe proceder de pacientes afectados de hepatitis o SIDA.

El gas utilizado para tonometrar debe estar humidificado y a la misma temperatura que el tonómetro y el analizador de gases sanguíneos (37 °C). (Únicamente deben emplearse mezclas gaseosas certificadas por un fabricante que ofrezca garantía de exactitud y, a ser posible, su composición debe verificarse mediante técnica de Schöllander^{5,10,11}). La jeringa debe purgarse con gas del tonómetro 3-5 veces antes de tomar la muestra definitiva y debe aspirarse la sangre lentamente con poca presión, evitando introducir burbujas que, de aparecer, deben ser retiradas rápidamente. Es fundamental que la transferencia de la muestra desde el

tonómetro hasta el aparato medidor de gases sea rápida, con objeto de minimizar su enfriamiento y evitar la difusión del gas.

Se recomienda que, *diariamente*, se efectúe *tonometría de 2 puntos* con los mismos gases que se utilizan (20 y 0% O₂) para la calibración rutinaria. Además, *mensualmente*, o siempre que se cambie el electrodo o su membrana, debe comprobarse el correcto funcionamiento del analizador de gases mediante *tonometría de 3 puntos*, generalmente al 0, 10 y 20%. Cuando deban analizarse muestras con cifras de PO₂ no habituales (hipo o hiperoxia) deben emplearse concentraciones gaseosas que engloben dichos valores: 3 y 5% para muestras hipóxicas (PO₂ aproximada de 28 y 35 mmHg, respectivamente) y 50 y 99% para las hiperóxicas (PO₂ aproximada, 350 y 700 mmHg, respectivamente)^{5,12}.

– *Soluciones acuosas tamponadas*. La comercialización de soluciones acuosas tamponadas pretende sustituir a la tonometría como control de calidad, además de reducir el riesgo de infección del personal técnico. Sin embargo, a pesar de que puedan ser útiles para calibrar los electrodos de pH y PCO₂, no lo son¹³ para el de PO₂. De emplearse, debe evitarse que el vial que las contiene se sujete con la palma de la mano, ya que al calentarse se modifica la presión parcial del gas que contiene. El procedimiento correcto comporta su agitación con los dedos. Además, es importante utilizar la muestra a la temperatura indicada por el fabricante, colocándose preferiblemente en un baño termostático.

– *Soluciones sanguíneas y mezclas perfluorocarbonadas*. La comercialización de soluciones sanguíneas no soluciona el problema de control de calidad y en cambio sí tiene un coste elevado. Las emulsiones de mezclas de perfluorocarbono se comportan de forma similar a la sangre tonometrada¹³, y pueden ser útiles para predecir diferencias entre instrumentos.

Mantenimiento

– *Diario*. Revisar el estado (presión) de las bombonas de calibración. Revisar el nivel de líquido de limpieza del electrodo. Si se trata de un aparato automático, debe introducirse el valor de presión atmosférica y las concentraciones de los gases utilizados para calibrar.

– *Semanal*. Verificar (y en su caso reemplazar) la cantidad de solución tamponada de cloruro del electrodo. Verificar el nivel de agua destilada de las cámaras de calibración.

– *Mensual*. Cambiar la membrana del electrodo. Limpiar y cambiar el agua destilada contenida en las cámaras de calibración. En todo caso se debe realizar el mantenimiento que cada fabricante establezca para sus equipos.

Electrodo de PCO₂

Calibración. La calibración del electrodo de PCO₂ implica, como en el caso de PO₂, la utilización de dos mezclas gaseosas, cuya concentración habitual suele corresponder al 5 y 10% de CO₂ (lo que equivale, aproximadamente, a valores de PCO₂

de 35 y 70 mmHg). Se debe realizar la *calibración de 1 punto* (5% CO₂) antes de cada medición y la *calibración de 2 puntos* (5 y 10% CO₂) cada 4 horas o cuando la de un punto exceda en ± 3 mmHg los valores esperados. Al empezar el día, se realizará la calibración de 2 puntos, y siempre la del 5% de CO₂ previa a la muestra.

Aunque los problemas del electrodo de PCO₂ no son tan complejos como los del de PO₂, las recomendaciones para su control de calidad son las mismas que para éste. Lo más apropiado es el empleo de muestras tonometradas (véase el apartado “Tonometría” en “Control de calidad y mantenimiento”) aunque, a diferencia del caso del electrodo de PO₂, las soluciones acuosas tamponadas son de utilidad (véase el apartado “Soluciones acuosas tamponadas” en “Control de calidad y mantenimiento”).

Mantenimiento

- *Diario*. Revisar el estado (presión) de las bombonas de calibración. Revisar el nivel de líquido de limpieza del electrodo. Si se trata de un aparato automático, debe introducirse el valor de presión atmosférica y las concentraciones de los gases utilizados para calibrar.
- *Semanal*. Verificar (y en su caso reemplazar) la cantidad de solución tamponada de bicarbonato sódico del electrodo.
- *Mensual*. Cambiar la membrana del electrodo. En todo caso debe efectuarse el mantenimiento recomendado por cada fabricante para sus equipos.

Co-oxímetro (medidor SO₂%)

Calibración. Debe calibrarse diariamente con soluciones acuosas tamponadas que deben estar a la temperatura que defina el fabricante y colocarse preferiblemente en un baño termostático. No obstante, para un correcto control de calidad, debe usarse la tonometría al menos una vez al mes.

Mantenimiento

- *Diario*. Limpiar la cámara de medición con una solución acuosa de polifosfatos y germicidas.

Obtención de la muestra

Condiciones generales¹⁴

Para realizar la punción arterial en el área del gabinete de pruebas funcionales respiratorias se precisa, como mínimo, una habitación de unos 5 m² que incorpore un lavabo para la limpieza y desinfección de las manos y todo el material necesario para la punción. También es conveniente disponer de una camilla por si el paciente se mareara tras la punción. En general, se recomienda que la extracción arterial se lleve a cabo con el paciente sentado, a excepción de aquellos que estén encamados. El paciente debe estar en reposo (sedestación) 10 min antes de la

punción, y en todo caso debe indicarse en la petición la posición del paciente durante la punción. La extracción arterial debe realizarse previamente a cualquier maniobra de función pulmonar. El paciente debe abstenerse de fumar y, a ser posible, de tomar broncodilatadores y vasodilatadores y/o recibir oxigenoterapia previamente a la punción, dependiendo de las condiciones clínicas de cada paciente. Como toda exploración, debe ser explicada detalladamente al paciente antes de su realización (apéndice 2).

Zona de punción

Al elegir la zona de punción debe tenerse en cuenta la accesibilidad del vaso y el tipo de tejido, ya que los músculos, tendones y grasa son menos sensibles al dolor que el periostio y las fibras nerviosas. Además, para reducir la probabilidad de punción venosa accidental, es preferible elegir arterias que no presenten venas satélites importantes. En general, la *arteria radial* en el túnel carpiano satisface todos estos requisitos, recomendándose como lugar de elección, aunque también puede utilizarse la arteria dorsorradial¹⁵. Si la circulación colateral es insuficiente en ambas arterias radiales (véase el apartado siguiente), o éstas son difícilmente accesibles, la *arteria humeral* en la fosa antecubital, inmediatamente por dentro del tendón del bíceps, constituye la segunda alternativa. La *arteria femoral sólo* se utilizará en casos excepcionales puesto que, por debajo del ligamento inguinal, no existe circulación colateral que actúe adecuadamente.

Circulación colateral (prueba de Allen)

En general, la muestra de sangre arterial que hay que analizar suele obtenerse por punción directa o mediante la utilización de un catéter arterial. Tanto en uno como en otro caso debe tenerse en cuenta que la invasión de la luz arterial puede provocar espasmo, formación de un trombo intramural o aparición de un hematoma periarterial. Cualquiera de estas complicaciones puede implicar isquemia distal. En consecuencia, es recomendable verificar la viabilidad de la circulación colateral si se pretende colocar un catéter arterial (véase el apartado siguiente). La prueba de Allen constituye un método sencillo y fiable para comprobarla en la arteria radial. Se pide al enfermo que abra y cierre vigorosamente el puño tras haber localizado y comprimido la onda de pulso radial y cubital. Tras 5-10 flexiones suele aparecer palidez isquémica palmar. Con la mano del enfermo extendida, se liberará la compresión cubital y se registrará el tiempo necesario para que reaparezca la coloración palmar habitual. En general¹⁶, se considera que la circulación colateral cubital es adecuada si ésta reaparece en menos de 15 s.

Técnica de punción arterial simple

Deben seguirse los siguientes pasos:

- Escoger la zona de punción.
- Limpieza de la piel con alcohol.
- Preguntar al paciente si tiene hipersensibilidad a la anestesia y si está recibien-

do tratamiento anticoagulante.

- Utilizar guantes desechables durante la punción.
- Inyectar subcutáneamente una pequeña cantidad (0,3 ml) de anestésico local, que no contenga adrenalina (para obviar el posible efecto vasoconstrictor). Se utilizan jeringuillas de administración de insulina con aguja fina (calibre inferior a 25 G). En algunos casos excepcionales puede observarse una reacción de hipersensibilidad local. Debe evitarse que la formación del habón suponga la pérdida de la onda de pulso. Aunque, en manos expertas, suele requerirse una sola punción para obtener una muestra, el empleo de anestesia local evita el dolor, disminuye la ansiedad y la hiperventilación. Por ello debe insistirse en el empleo de anestesia en la punción arterial^{17,18}.
- Comprobar que la zona infiltrada se halla plenamente anestesiada.
- Colocar la muñeca del paciente hiperextendida formando un ángulo aproximado de 45° con la aguja.
- Utilizar agujas de calibre inferior a 20 G.
- En condiciones ideales, debe obtenerse un reflujo de sangre pulsátil, capaz de elevar el émbolo de la jeringuilla de forma pasiva, obteniéndose entre 2 y 5 ml. Se aconseja el empleo de jeringuillas de vidrio, o jeringuillas especialmente diseñadas para la práctica de la gasometría. En su defecto, pueden utilizarse jeringas de plástico de tres cuerpos con émbolo de goma.
- Comprimir vigorosamente la zona de punción durante 2-3 min con objeto de prevenir la formación de hematoma. En pacientes con diátesis hemorrágica puede ser necesaria una compresión más prolongada (15-20 min).
- Asegurar que la jeringa sea hermética utilizando plastelina en la punta de la aguja u otro medio similar.

Catéter arterial

La punción se realizará según se describe en el apartado anterior para la punción simple. La canulación radial propiamente dicha se realiza siguiendo la técnica propuesta por Seldinger, es decir, mediante el empleo de una guía metálica que facilita la introducción posterior de un catéter de teflón (1,3 mm de diámetro). En ningún caso debe existir resistencia a la introducción de la guía metálica. De haberla, debe movilizarse suavemente la punta de la aguja hasta que el reflujo de sangre obtenido adquiera características pulsátiles *claras*; en este momento puede volver a introducirse la guía metálica que ha de facilitar la canulación radial propiamente dicha. Una vez colocado el catéter radial, se recomienda perfundir intermitentemente (cada 5-10 min) una pequeña cantidad (0,5 ml) de suero fisiológico heparinizado. Si se prevé que la canulación radial será prolongada (1-2 horas), esta maniobra puede sustituirse por un sistema de perfusión continua con manguito de presión. Tras la retirada del catéter se comprimirá la zona de punción hasta conseguir hemostasia completa (5-10 min) y se colocará un vendaje compresivo (4-6 horas).

En general, si se realiza por una persona con experiencia previa en la técnica y en condiciones asépticas adecuadas, la canulación radial percutánea es una técnica

sencilla, rápida, altamente eficaz, muy bien tolerada por el paciente y con escasas o nulas complicaciones que, por otra parte, son de mínima trascendencia clínica (hematoma, dolor en la zona de punción)¹⁶.

Por tanto, aunque existen métodos alternativos no cruentos, como la pulsioximetría (véase el apartado "Pulsioximetría"), se recomienda el empleo de la canulación radial para el análisis preciso del intercambio gaseoso pulmonar durante la práctica ambulatoria de una prueba de esfuerzo.

Punción capilar

La punción capilar constituye una forma alternativa de obtener una muestra sanguínea susceptible de ser interpretada como si se tratase de una muestra arterial. Suele emplearse en lactantes y niños en los que la punción arterial directa es muy difícil. No debe utilizarse en el paciente adulto. Se utilizan lancetas o, mejor, hojas de afeitar, en una zona (lóbulo de la oreja o yema de los dedos) cuya circulación se ha estimulado previamente con algún rubefaciente.

Manipulación de la muestra

La correcta manipulación de la muestra sanguínea por personal técnico cualificado reviste tanta importancia como el adecuado mantenimiento técnico de los aparatos de medición, aun cuando se utilicen máquinas automatizadas (véase el apartado "Control de calidad y mantenimiento")⁵. En este sentido, deben resaltarse los aspectos que detallamos a continuación:

Condiciones de la extracción

- La anticoagulación de la muestra sanguínea con heparina sódica es imprescindible. Sin embargo, una cantidad excesiva de heparina puede artefactuar los resultados. Por ello, se recomienda emplear un preparado de heparina poco concentrado (1.000 U/ml), humidificar cuidadosamente el émbolo y la jeringuilla de extracción y evitar que quede heparina libre en el interior de la jeringuilla, excepto en la llave de tres pasos, en caso que ésta sea utilizada para la extracción de sangre. En caso de que la gasometría se emplee también para efectuar la medición simultánea de iones (K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Cl^-) deben utilizarse heparinas de bajo peso molecular, dado que la heparina sódica habitual interfiere en los resultados iónicos. Si se emplea una aguja, es necesario asegurar su hermetismo, para lo cual es imprescindible su pronta sustitución por una llave de tres vías o un tapón adecuado (la plastelina es uno de los mejores y más económicos).
- Si se observa la existencia de burbujas de aire en el interior de la muestra sanguínea, debe procederse a su extracción inmediata, con la jeringa en posición vertical, evitando su agitación innecesaria.
- Si no existen burbujas en el interior de la muestra, o tras haberlas eliminado por completo, debe agitarse la jeringuilla evitando la formación de espuma (suele bastar con un ligero movimiento de rotación entre ambas manos), para asegurar que el efecto anticoagulante de la heparina existente en el émbolo y paredes interio-

res de la jeringa sea máximo.

Transporte y depósito

- Entre la extracción de la muestra sanguínea y su análisis no deben pasar, en condiciones habituales, más de 10-15 min. En todo momento es imprescindible mantener un hermetismo absoluto.
- Si se prevé que dicho lapso de tiempo será superior, la muestra arterial debe guardarse en hielo triturado¹⁹. Con ello se enlentece el metabolismo eritrocitario y se evita la disminución de la PO_2 y el aumento de la PCO_2 (con la consiguiente tendencia a la acidosis), que se producen con el paso del tiempo en condiciones de temperatura ambiental.

Precauciones previas a la lectura de la muestra

- La velocidad de sedimentación globular varía de forma notable de paciente a paciente en función de la enfermedad de base y del valor del hematócrito. Por tanto, para evitar dicha sedimentación es imperativo agitar la muestra sanguínea (al menos 30 s) inmediatamente antes de su introducción en el aparato lector. Debe evitarse la formación de espuma.
- El volumen de sangre contenido en el extremo distal de la jeringa (0,5 ml) debe ser desechado antes de proceder a su lectura, ya que puede haberse contaminado fácilmente con el aire ambiental. Además de mejorar la exactitud de la medición, esto proporciona la oportunidad de comprobar si realmente existen o no coágulos en el interior de la jeringa.
- Excepto en los aparatos provistos de un sistema automático de succión de la muestra, se aconseja inyectar más cantidad de sangre de la estrictamente necesaria para la medición (el volumen sobrante se eliminará a través de un sistema de desecho del que están provistos la mayoría de aparatos). Así se analiza una muestra más representativa del estado real del paciente. Por contra, en aquellos sistemas provistos de una entrada por succión, ésta debe ser introducida totalmente en el interior de la jeringa para evitar al máximo el contacto de la muestra sanguínea con el aire ambiente.
- La mayoría de aparatos actuales están provistos de un sistema de corrección automática en función de la temperatura corporal del paciente. Sin embargo, si éste no fuese el caso, debe disponerse de los factores de corrección apropiados, ya que la hipertermia tiende a elevar los valores de PO_2 y PCO_2 y a disminuir el de pH, mientras que la hipotermia ejerce un efecto opuesto. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la temperatura de los instrumentos de medición suele ser de 37 °C, cuando el paciente tiene una temperatura que oscila entre 35 y 39 °C, la corrección no es necesaria por su escasa transcendencia clínica, aunque existen controversias a este respecto⁷. De no ser así, y si el aparato en cuestión no dispone de un sistema automático de corrección, se usará la fórmula propuesta por Severinghaus (apéndice 1)³.

Lectura de la muestra

La muestra debe leerse, a ser posible, inmediatamente después de su obtención (véanse los apartados “Condiciones de la extracción” y “Transporte y depósito” en “Manipulación de la muestra”). La variabilidad de los actuales equipos de gases permite realizar una sola lectura, siempre que la muestra haya sido extraída, manipulada y procesada correctamente, dada la gran reproducibilidad de la técnica²⁰. Se recomienda anotar los resultados obtenidos inmediatamente después de cada lectura. Para ello, se dispondrá de una libreta junto al propio aparato, con objeto de evitar posibles errores de transcripción posterior. Junto a esto, es muy útil, además, disponer de otra libreta en la que se hará constar el mantenimiento efectuado, así como las posibles averías u otras incidencias que pudieran presentarse.

Datos que debe aportar la solicitud de gasometría

La solicitud de gasometría arterial debe aportar todos aquellos datos de posible interés tanto para la identificación del paciente, y posterior interpretación clínica

Gases sanguíneos					
Nombre y apellidos _____			Nº. referencia _____		
Servicio de _____		Cama _____	Ambulatorio	Si	No
Día _____		Hora _____			
Diagnóstico _____					
Sangre arterial ____	Venosa mixta ____	Otras _____			
Temperatura ____ °C	Hemoglobina ____ g/dl	FR ____	Sentado ____		
	Lesión nasal ____	Si	Decúbito ____		
Ventilación espontánea ____	Catéter nasal ____	Si			
	Ventil. FIO ₂ ____	%			
	Otras mascarillas, FIO ₂ ____	%			
Ventilación mecánica ____	Valores mínimo ____	Si	FIO ₂ ____ %		
La muestra se ha obtenido fácilmente	Si	No			
FR: frecuencia respiratoria; FIO ₂ : fracción inspiratoria de O ₂ .					

Figura 1.

del resultado (diagnóstico, condiciones de extracción, posición del paciente y tratamiento recibido), como para el cálculo de los diversos parámetros derivados (apéndice 1). Son absolutamente imprescindibles los valores de fracción inspiratoria de O₂ y temperatura del paciente. (fig. 1).

TABLA I. VALORES DE REFERENCIA PARA PaO₂ Y EL GRADIENTE ALVEOLOARTERIAL (AaPO₂)

PaO ₂ (mmHg):	104,2 – (0,27 × años) (sedestación)
PaO ₂ (mmHg):	103,5 – (0,42 × años) (supino)
AaPO ₂ (mmHg):	2,5 + (0,21 × años)

Tomada de la referencia bibliográfica 21.

TABLA II. VALORES NORMALES

	Arterial	Venoso mixto
PO ₂ (mmHg)	80-100	40
PCO ₂ (mmHg)	35-45	46
pH	7,35-7,45	7,36
P ₅₀ (mmHg)	25-28	
Temperatura (°C)	37,0	37,0
Hemoglobina (g/dl)	14,9	14,9
Contenido de O ₂ (ml/100 ml)	19,8	14,62
Combinado con hemoglobina	19,5	14,50
O ₂ disuelto	0,3	0,12
Saturación de hemoglobina	97,5	72,5
Contenido de CO ₂ (ml/100 ml)	49,0	53,1
Compuestos carbámínicos CO ₂	2,2	3,1
CO ₂ bicarbonato	44,2	47,0
CO ₂ disuelto	2,6	3,0

Valores de referencia

Aunque se han publicado decenas de ecuaciones para la predicción de los valores normales en individuos sanos de diferente edad²¹⁻²³ (tabla I), en la práctica clínica diaria se consideran normales, a nivel del mar, todos aquellos valores de PO₂ superiores a 80 mmHg, con cifras de PCO₂ situadas entre 35 y 45 mmHg y de pH entre 7,35 y 7,45. En cuanto al valor del gradiente alveoloarterial de O₂, debe situarse su límite superior en 15-20 mmHg, dependiendo de la edad del individuo (apéndice 1). En la tabla I se incluyen los valores de referencia de PaO₂ y AaPO₂ y en la tabla II los valores medios de las principales variables relacionadas con la medición de los gases sanguíneos, correspondientes a un sujeto de 25 años de edad, en reposo.

Fuentes de error

Existe toda una serie de factores que pueden dar lugar a una medición errónea y, en consecuencia, a una interpretación incorrecta de los valores gasométricos. En la tabla III se incluyen las fuentes de error más frecuentes.

Medidas higiénicas y profilácticas

La manipulación de muestras sanguíneas siempre entraña un cierto riesgo de infección accidental. Por tanto, las medidas higiénicas y profilácticas deben extremarse al máximo, especialmente si la persona que manipula las muestras presenta heridas o escoriaciones cutáneas, debido al riesgo de adquirir hepatitis. En general, todo el personal que realiza la punción arterial debe desinfectarse las manos antes y después de cada una de ellas y usar guantes desechables²⁴. Comer, beber y fumar debe prohibirse en la zona de análisis. Todo el material utilizado en la obtención de muestras debe ser depositado en recipientes especiales para material

TABLA III. FUENTES DE ERROR

Punción arterial dolorosa (sin anestesia)
Punción venosa
Exceso de heparina en la jeringa de extracción
Burbujas en la muestra
Muestra en contacto con el aire (sin tapón)
Tiempo superior a 10-15 min entre la extracción y el análisis de la muestra
Muestra expuesta a calor (no estar conservada en frío)
No agitar suficientemente la muestra
No despreciar el espacio muerto de la muestra
No calibrar con la periodicidad necesaria
No realizar controles de calidad
No realizar un mantenimiento preventivo
Desconocimiento de la temperatura del paciente
Desconocimiento de la FIO ₂
Leucocitosis superior a 50.000 leucocitos/ml

contaminado, especialmente las agujas, que lo serán en cajas no perforables. Aquellos materiales que hayan estado en contacto con sangre de pacientes afectados de hepatitis o sida deben identificarse siguiendo las normas propias de cada hospital.

Las solicitudes de análisis y las muestras de pacientes con posibilidad de padecer enfermedades transmisibles de alto riesgo biológico (sida, hepatitis B, hepatitis no A no B, mononucleosis infecciosa e infecciones por citomegalovirus) deben identificarse adecuadamente.

En este tipo de pacientes es imperativo el uso de jeringas desechables. En el tonómetro deben desinfectarse rutinariamente todas las partes que estén en contacto con la muestra sanguínea, como la cámara de humidificación y la cubeta. En algunos laboratorios, para prevenir la contaminación bacteriana, se colocan mensualmente en dicha cubeta 0,5 µg de bacitracina y 0,01 µg de neomicina por mililitro de sangre¹⁰. También es recomendable extremar las medidas higiénicas y profilácticas durante las operaciones de mantenimiento de los aparatos, especialmente de aquellas zonas en contacto directo habitual con la muestra sanguínea.

Métodos alternativos

Durante las dos últimas décadas se han desarrollado diversos métodos alternativos, generalmente no invasivos, para la medición y/o control de los gases sanguíneos²⁵. Aunque se ha registrado un progreso mínimo en la medición no invasiva del valor del pH, existen cuatro importantes áreas de desarrollo tecnológico que merecen comentario aparte. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que se trata de nuevas tecnologías y que, por tanto, se encuentran en un proceso continuo de transformación.

Pulsioximetría

La pulsioximetría constituye un método no invasivo que pretende evaluar el valor de saturación arterial de oxihemoglobina. Su funcionamiento se basa en el mismo principio espectrofotométrico que se utiliza para su medición directa en sangre (véase el apartado “Saturación de oxihemoglobina” en “Medición. Fundamentos teóricos”). En resumen, cuantifica la cantidad de luz (de una determinada longitud de onda) que absorbe la oxihemoglobina. Por ello, estos equipos tan sólo son capaces de cuantificar el valor de $SO_2\%$, pero no proporcionan información alguna sobre los valores de PO_2 , PCO_2 o pH arterial. Es más, debido a la especial morfología de la curva de disociación de la oxihemoglobina (forma sigmoidea o de S itálica), si los valores de $SO_2\%$ se sitúan en la porción plana (valores superiores al 85%) pueden producirse notables cambios en la PO_2 sin que apenas varíe el correspondiente valor de $SO_2\%$. Debe tenerse en cuenta, además, que la presencia de ictericia, grosor excesivo de la piel, pigmentación cutánea, perfusión sanguínea cutánea reducida o concentraciones de carboxihemoglobina superiores al 3% pueden interferir significativamente los resultados proporcionados por los pulsioxímetros. La exactitud de todos los pulsioxímetros disminuye con $SaO_2 > 75\%$, mostrando tendencia a la sobreestimación de la saturación real.

Desde el punto de vista clínico, los pulsioxímetros se han mostrado eficaces y útiles en la investigación de los trastornos del intercambio gaseoso que pueden producirse en determinadas patologías durante el sueño, en la evaluación convencional de la adaptación al esfuerzo (pruebas de esfuerzo), durante la práctica de una fibrobroncoscopia en un paciente de alto riesgo (con insuficiencia respiratoria grave acompañante), y en la indicación ambulatoria de oxigenoterapia domiciliaria continua y en las áreas quirúrgicas y de medicina intensiva. Sin embargo, si se requiere una evaluación precisa del intercambio gaseoso pulmonar, es imprescindible disponer de una muestra de sangre arterial y cuantificar directamente los valores de PO_2 , PCO_2 y pH. En tales circunstancias, especialmente si se requiere la obtención de muestras repetidas en un breve período de tiempo, es recomendable el empleo de un catéter arterial (véase apartado “Catéter arterial”). Aun más, aunque el pulsioxímetro puede ser útil en determinados estudios epidemiológicos, no existen resultados contrastados sobre su posible utilidad en el contexto de un enfermo en situación crítica, por lo que en tales circunstancias debe recomendarse el empleo de la gasometría arterial.

Electrodos transcutáneos

Los electrodos de Clark y Severinghaus (véanse apartados “Electrodo de PO_2 ” y “Electrodo de PCO_2 ” en “Medición. Fundamentos teóricos”) se han modificado de forma que pueden emplearse para la cuantificación de la PO_2 y PCO_2 a través de la superficie cutánea. Es imprescindible que el flujo sanguíneo hacia la zona cutánea de lectura sea elevado, por lo que todos ellos calientan dicha zona entre 43° y 45 °C. Por ello siempre producen eritema local y, si no se cambian periódicamente de localización, pueden provocar quemaduras cutáneas.

Desde el punto de vista clínico, se emplean mayoritariamente entre la población de enfermos pediátricos y todavía no se ha demostrado de forma fehaciente su

APÉNDICE 1. ECUACIONES DE CÁLCULO (TABLA I)

TABLA I. ECUACIONES DE CÁLCULO

1. Gradiente alveoloarterial de O₂ (AaPO₂). $AaPO_2 = PAO_2 - PaO_2$ $PAO_2 = P_1O_2 - [PaCO_2 \times (F_1O_2 + [(1 - F_1O_2)/R])]$
2. Contenido arterial de O₂ (CaO₂). $CaO_2 = (SaO_2\% \times 1,34 \times Hb) + (0,003 \times PaO_2)$.
3. Aporte de O₂ (OD). $OD = CaO_2 \times \dot{Q}_T$
4. Cociente de mezcla venosa (\dot{Q}_s/\dot{Q}_T). $\dot{Q}_s/\dot{Q}_T = [(Cc' O_2 - CaO_2)/(Cc' O_2 - CvO_2)] \times 100$
5. Cociente V_D/V_T . $V_D/V_T = (PaCO_2 - P_E C_2)/PaCO_2$

1. Gradiente alveoloarterial de O₂ (AaPO₂).

El gradiente o diferencia alveoloarterial de O₂ (AaPO₂) es la diferencia existente entre los valores de PO₂ alveolar (PAO₂) y arterial (PaO₂). Debido a que, a diferencia de la PaO₂, no se halla influida por el nivel de ventilación alveolar (su cálculo ya tiene en cuenta el valor de PaCO₂), constituye una excelente medida de la situación real del intercambio gaseoso pulmonar. En particular refleja groseramente si hay alteraciones en las relaciones ventilación-perfusión (\dot{V}_A/\dot{Q}), la difusión alveolocapilar de O₂ y el *shunt*. En otras palabras, la constatación de un valor anormal evidencia una alteración parenquimatosa pulmonar, mientras que un valor de AaPO₂ normal junto a hipoxemia e hipercapnia debe sugerir hipoventilación alveolar²⁸. Se calcula mediante la ecuación del gas alveolar, cuya formulación más simple es:

$$PAO_2 = P_1O_2 - [PaCO_2 \times (F_1O_2 + [(1 - F_1O_2)/R])]$$

donde P₁O₂ corresponde a la PO₂ inspirada, F₁O₂ a la fracción inspiratoria de O₂ (aire ambiente: 0,21) y R al cociente respiratorio ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) que, de no medirse, suele equipararse a 0,8 (en la tabla II, se incluyen los valores normales).

2. Contenido arterial de O₂ (CaO₂).

Corresponde a la cantidad total de O₂ contenido en sangre (arterial o venosa). Depende, por tanto, de la suma del O₂ transportado en combinación química reversible con la hemoglobina (SO₂%) y de la cantidad disuelta en plasma (PO₂):

$$CaO_2 = (SaO_2\% \times 1,34 \text{ [ml/g]} \times Hb \text{ [g/dl]}) + (0,003 \times PaO_2 \text{ [mmHg]})$$

donde 1,34 corresponde a la cantidad máxima de O₂ que puede transportar 1 g de hemoglobina saturada al 100%, aunque algunos autores²² recomiendan el valor de 1,39 Hb a la concentración plasmática de hemoglobina (g/dl) y 0,003 al coeficiente de solubilidad del O₂ en plasma. Según se apliquen valores arteriales o venosos mixtos, se habla de contenido arterial (CaO₂) o venoso mixto (CnO₂) de O₂, respectivamente. Sus valores suelen expresarse en volúmenes por cien (vols%). En el individuo sano, el valor de CaO₂ oscila alrededor de los 20 vols% y el de CvO₂ sobre los 15 vols%.

3. Aporte de O₂ (OD).

El aporte de O₂ equivale al producto del contenido arterial de O₂ y el gasto cardíaco (\dot{Q}_T) (ml/min.).

$$OD = CaO_2 \times \dot{Q}_T$$

Su valor normal en el individuo sano oscila alrededor de los 1.000 ml/min.

4. Cociente de mezcla venosa (\dot{Q}_s/\dot{Q}_T).

Equivale al porcentaje del gasto cardíaco capaz de explicar toda la hipoxemia arterial del paciente como si toda ella estuviese causada por la perfusión de unidades alveolares no ventiladas (cortocircuito o *shunt*). Sin embargo, si se cuantifica respirando aire ambiente, su valor también se ve influido por la

perfusión de unidades con cociente \dot{V}_A/\dot{Q} reducido, por lo que se habla de porcentaje de mezcla venosa (*venous admixture*). Por el contrario, debido a que dichas unidades alveolares con cocientes \dot{V}_A/\dot{Q} bajos son capaces de oxigenar la sangre venosa mixta si se respira O_2 al 100%, su cuantificación tras 20-30 min de respirar O_2 al 100% expresa el porcentaje del gasto cardíaco que realmente se halla perfundiendo unidades alveolares con cociente $\dot{V}_A/\dot{Q} = 0$. Por tanto, en tales circunstancias puede hablarse de porcentaje de *shunt**. De todos modos, debe tenerse en cuenta que la propia respiración de O_2 al 100% durante dicho período de tiempo es capaz de modificar sustancialmente la distribución basal de los cocientes^{29,30} \dot{V}_A/\dot{Q} . Para la cuantificación del cociente \dot{Q}_S/\dot{Q}_T debe disponerse del contenido de O_2 en sangre arterial, venosa mixta y capilar ideal (c') (CaO_2 , $C\bar{v}O_2$ y $Cc'O_2$, respectivamente):

$$\dot{Q}_S/\dot{Q}_T = ((Cc'O_2 - CaO_2)/(Cc'O_2 - C\bar{v}O_2)) \times 100$$

El valor del $Cc'O_2$ se calcula a partir de la cifra de PO_2 alveolar teórica (respirando aire, equivale a 100-110 mmHg). El valor del \dot{Q}_S/\dot{Q}_T se expresa en forma de porcentaje del \dot{Q}_T . En el individuo sano no debe ser superior al 5%.

5. Cociente V_D/V_T .

El cociente V_D/V_T proporciona información sobre el extremo opuesto del espectro de la distribución de las relaciones \dot{V}_A/\dot{Q} pulmonares, es decir, sobre la posible existencia de unidades bien ventiladas pero escasamente perfundidas, o ventiladas pero no perfundidas en absoluto (espacio muerto fisiológico). Se compone de la suma del espacio muerto anatómico y todas aquellas unidades alveolares ventiladas pero no perfundidas (espacio muerto alveolar). Su cálculo comporta la medición de la $PaCO_2$ y del valor de la fracción espiratoria mixta de CO_2 (P_ECO_2), por lo que se aparta del tema de esta monografía. Tan sólo señalar que su valor se calcula mediante la ecuación de Bohr:

$$V_D/V_T = (PaCO_2 - P_ECO_2)/PaCO_2$$

6. Corrección del valor de PO_2 en función de la temperatura.

Se utiliza la fórmula propuesta por Severinghaus³:

$$PO_2 = PO_2 \text{ medida} \times 10^{F(\text{temp}-37 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

donde F corresponde a $(0,058/[A+1] + 0,013)/2,3026$ y A equivale a $0,243 \times (PO_2/100)$.

7. Cálculo de la PO_2 en condiciones estándar.

El valor de PO_2 a un pH de 7,40 y PCO_2 de 40 se calcula de la forma siguiente:

$$P O_2' = (PO_2 \text{ medida}) \times (e^y)$$

donde $y = ([PO_2 \text{ medida}/26,7]^{0,184} + 0,003 \times EB - 2,2)$ (7,4-pH medido) y EB al exceso de base.

8. Cálculo de los principales parámetros del intercambio de gases y equilibrio ácido-base.

Los analizadores de gases de las últimas generaciones incorporan el software necesario para calcular de forma automática la $AaPO_2$, el CaO_2 y la SaO_2 . Para ello es necesario introducir los valores de temperatura ($^\circ\text{C}$), Hb (g/dl) y $F_I O_2$ (%), observados durante la extracción.

Además, a partir de las cifras de pH y $PaCO_2$, calculan diversos parámetros metabólicos, imprescindibles para la interpretación global del equilibrio ácido-base (bicarbonato $[CO_3H^-]$, CO_2 total, exceso de bases [BE], bicarbonato estándar [SBC], etc.).

*De hecho, para cuantificar realmente el valor del *shunt* debe utilizarse la técnica de eliminación de gases inertes múltiples³¹.

APÉNDICE 2

Material fungible necesario para la práctica de una gasometría arterial

- Jeringa de vidrio de 3 ml, kit para gasometría o jeringa de plástico con émbolo de goma 3 ml, con aguja 1,1 × 25 mm (para extracción).
- Jeringa de insulina 1 ml con aguja (para anestesia).
- Heparina al 1%.
- Anestésico sin vasoconstrictor. Plastelina.
- Catéter arterial 1,33 mm de diámetro (si se requiere su empleo).
- Llave de 3 vías y jeringa de 5 ml para espacio muerto instrumental (si se utiliza catéter).
- Alcohol, algodón, gasas, esparadrapo, vendaje compresivo y *guantes desechables* (para la extracción).

Material fungible para el aparato de gasometría

- Solución acuosa tamponada para la calibración del pH a 7,384 y 6,846.
 - Bombonas con concentraciones de O₂ y CO₂ para calibrar los electrodos de PO₂ y PCO₂, así como para la tonometría.
 - Solución de limpieza para después de cada muestra de gasometría.
 - Cloruro potásico para saturar el electrodo de referencia de pH. Solución de limpieza para eliminar las proteínas del electrodo de pH.
 - Solución tamponada de cloruro potásico del electrodo de PO₂. Solución tamponada de bicarbonato sódico del electrodo de PCO₂.
 - Soluciones acuosas tamponadas para la calibración del cooxímetro.
 - Membranas de PO₂ y PCO₂.
-

APÉNDICE 3

Concepto de hipoxemia, hipoxia e insuficiencia respiratoria

Los conceptos de hipoxemia e hipercapnia quedan perfectamente delimitados en la definición de insuficiencia respiratoria, situación clínica en la que los valores de la presión parcial de O₂ en sangre arterial están reducidos (hipoxemia) o los de PaCO₂ están elevados (hipercapnia). De forma más concreta, debe entenderse por insuficiencia respiratoria aquel estado caracterizado por la existencia de un valor de PaO₂ inferior a 60 mmHg o de PaCO₂ igual o superior a 50 mmHg (en situación de reposo y a nivel del mar), siempre que previamente se hayan excluido la hipoxemia secundaria a comunicaciones intracardíacas derecha-izquierda y la hipercapnia secundaria a alcalosis metabólica. Este concepto es biológico y depende exclusivamente del valor de los gases en sangre arterial. En la tabla I se incluye una clasificación de los grados de hipoxemia. Por hipoxia se entiende aquella situación caracterizada por una falta de O₂ en los tejidos, generalmente debida a un aporte insuficiente.

TABLA I. GRADOS DE HIPOXEMIA

Severidad	Valores (mmHg)
Ligera	Entre 80 y 71
Moderada	Entre 70 y 61
Severa (grave)	Entre 60 y 45
Muy severa (muy grave)	Inferior a 45

utilidad en el paciente adulto²⁵. En general, se acepta que los valores de PO₂ y PCO₂ que proporcionan se correlacionan adecuadamente con los cuantificados en sangre arterial. Sin embargo, existe una serie de factores que pueden modificar esta relación de forma sustancial: la disminución del flujo capilar cutáneo, el aumento local de consumo de oxígeno, los cambios en la permeabilidad cutánea y, especialmente, ciertos agentes anestésicos (halotano).

Sistemas de monitorización intravascular

En 1958 se modificó el electrodo de Clark para la medición intravascular de PO₂. Desde entonces se han desarrollado sistemas más sofisticados para la medición intravascular directa, basados generalmente en el empleo de un cromatógrafo de gases o de un espectrómetro de masas. Sin embargo, se ha cuestionado su exactitud y actualmente están en desuso.

Estos métodos han sido superados por monitores de medición intravascular que, de manera intermitente o continua, miden el pH, PO₂ y PCO₂ sin extracción sanguínea. Basándose en la fibra óptica y la tecnología de los microprocesadores combinadas con técnicas ópticas que modifican la luz sin consumir reactivos, esta metodología ha permitido el desarrollo de sensores miniaturizados que detectan cambios de luz "optodos". Los monitores intravasculares pueden reducir significativamente el tiempo de espera en la toma de decisiones, evitar la continua toma de muestras en los pacientes de cuidados intensivos y reducir los riesgos de infección nosocomial^{26,27}.

Bibliografía

1. Severinghaus JW, Brandley AF. Electrodes for blood PO₂ and PCO₂ determinations. *J Appl Physiol* 1958; 13: 515-520.
2. Clark LC. Monitor and control of blood and tissue oxygen tensions. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 1956, 2: 41-48.
3. Severinghaus JW. Blood gas calculator. *J Appl Physiol* 1966; 21: 1.108-1.116.
4. Kelman GR. Digital computer subroutine for the conversion of oxygen into saturation. *J Appl Physiol* 1966; 21: 1.375-1.376.
5. Gardner RM, Clausen JL, Epler G, Hankinson JL, Pemmutt S, Plummer AL. Pulmonary function laboratory personnel qualifications. *Am Rev Respir Dis* 1986; 134: 623-624.
6. ATS: Blood Gas Proficiency Program 1983; 1: 4-5.
7. ATS News. Blood gas survey 1985;11: 35-39.
8. Hansen JE, Clausen JC, Levy SE, Mohler JG, Van Kessel AL. Proficiency testing materials for pH and blood gases. The California Thoracic Society Experience. *Chest* 1986; 89: 214-217.
9. Chalmers C, Bird BD, Whitwam JG. Evaluation of a new thin film tonometer. *Br J Anaesthesiol* 1974; 46: 253-259.
10. Clausen JL. Pulmonary function testing guidelines and controversies. Orlando: Academic Press, 1982.
11. Schöllander PF. Analyzer for accurate estimation of respiratory gases in one-half cubic centimeter sample. *J Bio Chem* 1947; 167: 235-250.
12. Rhodes PG, Moser KM. Source of error in oxygen tension measurement. *J Appl Physiol* 1966, 21: 729-734.
13. Hansen EJ, Feil CF. Blood gas quality control. Materials compared to tonometer blood in examining for interinstrument bias in PO₂. *Chest* 1988; 94: 59-64.
14. Ussetü P. Gasometría arterial. *Medicine (Madrid)* 1985; 26: 1.097-1.102.
15. Pyles ST, Scher KS, Vega ET, Harrah JD, Rubis LJ. Cannulation of the dorsal radial artery: a new technique. *Anesth Analg* 1982; 61: 876-879.

16. Agustí AGN, Roca J, Rodríguez-Roisín R, Agustí-Vidal A. Canulación radial percutánea en pacientes ambulatorios. Tolerancia y complicaciones. *Arch Bronconeumol* 1987; 23: 39-41.
17. Cinel D, Markwell K, Lee R, Szidon P. Variability of the respiratory gas exchange ratio during arterial puncture. *Am Rev Resp Dis* 1991; 143:217-218.
18. Giner J, Casan P, Belda J, González M, Miralda RM, Sanchis J. Pain during arterial puncture. *Chest* 1996; 110: 1.443-1.445.
19. Liss HP, Payne CP. Stability of blood gases in ice and at room temperature. *Chest* 1993; 103: 1.120-1.122.
20. Agustí AGN, Roca J, Barberà JA, Casademont J, Rodríguez-Roisin R, Wagner PD. Effect of sampling site on femoral venous blood gas values. *J Appl Physiol* 1994; 77: 2.018-2.022
21. Tisi GM. Arterial blood gases and pH. En: Tisi GM, editor. *Pulmonary physiology in clinical medicine*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1980; 78.
22. West JB. *Respiratory physiology*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1985.
23. Murray JF. Gas exchange and oxygen transport. En: Murray JF, editor. *The normal lung*. Filadelfia: WB Saunders Co, 1986; 173.
24. Torres A, Burgos F, Casán P, Gravalos J, Martínez Moratalla J, Pi-Sunyer T. Normativa sobre el control microbiológico en los equipos de función y terapia respiratoria. Recomendaciones SEPAR 18. Barcelona: Doyma, 1995.
25. Malley WJ. Noninvasive blood gas monitoring. En: Malley WJ, editor. *Clinical blood gases.- Application and noninvasive alternatives*. Filadelfia, W.B. Saunders, 1990.
26. Mahutte CK, Holody M, Maxwell TP, Chen PA, Sasse SA. Development of patient-dedicated, on demand, blood gas monitor. *Am J Respir Crit Care Med* 1994; 149:852-859.
27. Shapiro BA. Blood gas monitors. Justifiable enthusiasm with a note of caution. *Am J Respir Crit Care Med* 1994; 149:850-851.
28. Raffin TA. Indications for arterial blood gas analysis. *Ann Intern Med* 1986; 105: 390-398.
29. Briscoe WA, Cree EM, Filler J, Houssay HEJ, Cournand A. Lung volume, alveolar ventilation and perfusion interrelationships in chronic pulmonary emphysema. *J Appl Physiol* 1960; 15: 785-795.
30. Dantzker DR, Wagner PD, West JB. Instability of lung units with low VA/Q ratios during O₂ breathing. *J Appl Physiol* 1975; 38: 886-895.
31. Wagner PD, Saltzman HA, West JB. Measurement of continuous distributions of ventilation-perfusion ratios: theory. *J Appl Physiol* 1974; 36: 588-599.