

## Investigación científica básica

# Alteraciones de los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> y pH en líquido cefalorraquídeo, durante y después del clampaje de la aorta torácica: estudio experimental

Fatma Ulus<sup>1</sup>, Anders Hellberg<sup>2</sup>, A. Tulga Ulus<sup>3</sup> y Sadettin Karacagil<sup>2</sup>, Ankara, Turquía, y Uppsala, Suecia

En un modelo de clampaje aórtico, estudiamos el uso de un sensor multiparamétrico para determinar los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> y pH en líquido cefalorraquídeo (LCR) durante y después del clampaje aórtico. El presente estudio abordó las alteraciones mencionadas previamente y su relación de acuerdo con intervalos de tiempo. En 31 cerdos, se introdujo un sensor en el espacio intratecal y se utilizó fluximetría láser Doppler para determinar el flujo sanguíneo de la médula espinal (FME). Aplicando el clampaje a diferentes niveles, se obtuvieron tres grupos distintos de isquemia de médula espinal (leve, moderada y grave). Las variables del LCR con FME se estudiaron para cambios del 25%, 50% y 100% de acuerdo con el nivel basal. En el período de clampaje, el FME disminuyó un 71,5%, 40,0%, y 33,3% en el grupo 1, 2 y 3, respectivamente. La tensión de O<sub>2</sub> en LCR alcanzó 0 en el grupo 1, disminuyó un 74,8% en el grupo 2, y fue del 12,7% en el grupo 3. La tensión de CO<sub>2</sub> en LCR aumentó un 247,2% y un 202,0% en los grupos 1 y 2, respectivamente, pero aumentó ligeramente en el grupo 3. El tiempo de reacción máxima de la tensión de O<sub>2</sub> en el LCR fue de alrededor de 16,7-26,9 min, aunque este intervalo fue de 34,5-49,8 min en la tensión de CO<sub>2</sub> en LCR. Comprobamos que la tensión de O<sub>2</sub> reacciona con más rapidez que la PCO<sub>2</sub> y el pH. Es posible que en un medio isquémico la tensión de O<sub>2</sub> se use con más rapidez que el CO<sub>2</sub> producido, aunque es bien conocido que la tasa de difusión de éste es mucho mayor. La monitorización de la tensión de O<sub>2</sub> en la médula espinal es un importante método para detectar los cambios isquémicos.

## INTRODUCCIÓN

Durante la oclusión aórtica, se requieren métodos fiables de monitorización de los cambios isquémicos de la médula espinal. Para prevenir los déficits neurológicos secundarios a una lesión isquémica de esta estructura, la evaluación perioperatoria del líquido cefalorraquídeo (LCR) puede contribuir a monitorizar los cambios isquémicos. Previamente documentamos el uso de la monitorización continua de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> y pH en un modelo experimental de oclusión aórtica torácica<sup>1</sup>. Los resultados de estos estudios indicaron que, durante el clampaje aórtico en cerdos, la monitorización intratecal de PO<sub>2</sub> y PCO<sub>2</sub> se correlacionó con los cambios de la médula espinal evaluados mediante microscopía electrónica<sup>2</sup>.

DOI of original article: 10.1016/j.avsg.2008.06.004.

Presentado en la 16 Reunión Anual de la Mediterranean Association of Cardiology and Cardiac Surgery, Bodrum, Turquía, 26-29 de septiembre de 2004.

<sup>1</sup>Department of Anesthesiology, Atatürk Training and Research Hospital for Chest Disease and Thoracic surgery, Ankara, Turquía.

<sup>2</sup>Department of Surgery, University Hospital, Uppsala, Suecia.

<sup>3</sup>Department of Cardiovascular Surgery, Türkiye Yüksek İhtisas Hospital, Ankara, Turquía.

Correspondencia: A. Tulga Ulus, MD, Department of Cardiovascular Surgery, Türkiye Yüksek İhtisas Hospital, 06100 Sıhhiye, Ankara, Turquía. Correo electrónico: [ulus@yahoo.com](mailto:ulus@yahoo.com)

Ann Vasc Surg 2009; 23: 22-27

DOI: 10.1016/j.avsp.2008.06.011

© Annals of Vascular Surgery Inc.

Publicado en la red: 26 de julio de 2008,

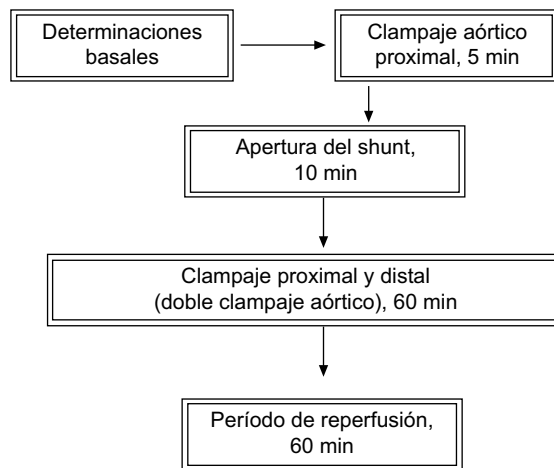


Fig. 1. Diseño del estudio.

Puesto que el método permite la monitorización continua, en el presente estudio analizamos los registros en línea durante períodos de clampaje y reperusión para proporcionar información más detallada sobre las alteraciones de la PO<sub>2</sub> y PCO<sub>2</sub> en LCR con respecto al grado de isquemia de la médula espinal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se usaron un total de 31 cerdos<sup>1,3</sup> (13 machos y 18 hembras, que pesaban  $27 \pm 0,7$  kg). Todos los animales se trataron en cumplimiento con los *Principles of Laboratory Animal Care* y la *Guide for the Care and Use of Laboratory Animals* (National Institutes of Health, publication 86-23, revisada en 1985). Se obtuvo la aprobación del estudio del comité de investigación en animales.

Previamente se han descrito el método de anestesia y el modelo experimental<sup>2</sup>. En pocas palabras, se utilizó anestesia intravenosa con ketamina (Ketaminol, Intervet, Skovlunde, Dinamarca), morfina y pancuronio y los animales se conectaron a un respirador después de la traqueostomía. Se registraron las determinaciones hemodinámicas durante todos los experimentos. Se efectuó una esternotomía media, y la disección se extendió hasta la aorta abdominal y la arteria ilíaca común izquierda a través de un abordaje retroperitoneal paramedial izquierdo. Se disecaron ambas arterias subclavas, la aorta torácica descendente y la aorta abdominal, junto con las arterias ilíacas, viscerales abdominales, intercostales (T4-T13) y lumbares. Se efectuó una laminectomía torácica limitada y sobre un introductor arterial con aguja, se introdujo un sensor multiparamétrico de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, pH y temperatura (Paratrend 7; Biomedical Sensors, High Wycombe,

Reino Unido) en el espacio intratecal para la monitorización continua de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, y pH en LCR. Previamente se han descrito los principios y el uso de este método para la detección de isquemia de la médula espinal durante el clampaje aórtico experimental y clínico preliminar<sup>1-3</sup>. Esta sonda consiste en un sistema combinado de electrodo-fibra óptica que, después de un período de calibración de 30 min, determina simultáneamente los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, pH y temperatura. Se obtuvieron continuamente determinaciones derivadas del sensor Paratrend durante todo el estudio. Se introdujo una sonda de láser Doppler (sonda T201; Perimed, Suecia) posterior a la duramadre (craneal al nivel de inserción del catéter Paratrend) y conectada con un fluxímetro de láser Doppler (PF2B; Perimed, Estocolmo, Suecia) para determinar el flujo sanguíneo de la médula espinal (FME). Los valores se muestran como porcentaje de los basales.

Como *shunt* aórtico, se insertó un tubo de plástico no heparinizado a través de la arteria subclavia izquierda proximal, cerca del cayado aórtico, y hasta la aorta abdominal distal a través de la arteria ilíaca común izquierda proximal. Se clampó la aorta torácica distal a la arteria subclavia izquierda (período de clampaje aórtico proximal de sólo 5 min). También se clampó la arteria subclavia derecha, seguido de la interrupción de las arterias lumbares con ligaduras. Antes de restablecer la presión aórtica distal a través del *shunt* aórtico durante 10 min (período de *shunt* abierto de 10 min), se permitieron 5 min para los registros en LCR. El flujo a través del *shunt* se monitorizó continuamente mediante ecografía a través del tiempo de tránsito (sonda 6RB32; Transonic Systems, Ithaca, NY). El flujo medio del *shunt* fue de  $971,8 \pm 59,3$  ml/min. A continuación, se clampó la aorta torácica distal durante 60 min (doble clampaje aórtico de 60 min), seguido de reperusión de 60 min (fig. 1).

En algunos de los animales se ligaron las arterias entre T11 y L1 para obtener diversos grados de isquemia de la médula espinal. Además, en 17 animales el nivel de clampaje aórtico distal fue inferior a L1, lo que permitió la perfusión de tan sólo las arterias viscerales a través del *shunt* (11 animales del grupo 1, tres del grupo 2 y tres del grupo 3). En 14 animales (uno del grupo 1, seis del grupo 2 y siete del grupo 3), el clampaje aórtico distal se efectuó por encima de T12 y se mantuvo la perfusión de la médula espinal (T12-L1) junto con las arterias viscerales a través del *shunt*. Algunos de los animales se habían incluido previamente en otros estudios de modo que agrupamos dos modelos diferentes de isquemia.

Treinta y un animales se dividieron en tres grupos con una agrupación retrospectiva de los animales de

**Tabla I.** Determinaciones de los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, y pH en líquido cefalorraquídeo (LCR) como cambios del 25%, 50% y 100% de acuerdo con los valores basales y tiempos de reacción después de clampaje aórtico proximal

Parámetros en LCR en los diversos grupos	Alteraciones en min (n)				
	25%	50%	100%	Máximo	Cambio máximo (%)
<b>PO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	1,0 ± 0,2 (12)	2,0 ± 0,5 (10)	—	3,6 ± 0,5 (12)	-65,3 ± 4,6* (12)
Grupo 2	0,8 ± 0,2 (8)	1,5 ± 0,2 (8)	—	3,4 ± 0,4 (9)	-71,4 ± 6,3* (9)
Grupo 3	0,9 ± 0,2 (9)	1,4 ± 0,4 (6)	—	2,0 ± 0,3 (10)	-46,3 ± 6,6* (10)
Todos	0,9 ± 0,1 (29)	1,7 ± 0,2 (24)	—	3,2 ± 0,3 (31)	-63,3 ± 3,7 (31)
<b>PCO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	3,5 ± 0,7 (4)	5,0 ± 1,0 (2)	5,1 (1)	5,6 ± 0,7 (12)	+26,6 ± 8,9 (12)
Grupo 2	3,6 ± 0,8 (3)	2,9 (1)	4,3 (1)	4,9 ± 0,6 (9)	+50,6 ± 23,2 (9)
Grupo 3	3,9 ± 1,4 (5)	2,1 (1)	—	4,8 ± 1,6 (10)	+27,9 ± 10,4 (10)
Todos	3,7 ± 0,6 (12)	3,8 ± 0,8 (4)	4,7 ± 0,4 (2)	5,2 ± 0,5 (31)	+36,2 ± 9,9 (31)
<b>pH</b>					
Grupo 1	—	—	—	5,5 ± 0,7 (12)	-1,7 ± 0,4 (12)
Grupo 2	—	—	—	5,2 ± 0,7 (9)	-2,5 ± 1,0 (9)
Grupo 3	—	—	—	5,2 ± 2,0 (10)	-2,2 ± 0,8 (10)
Todos	—	—	—	5,3 ± 0,6 (31)	-2,1 ± 0,4 (31)

\*p &lt; 0,05.

acuerdo con el grado de los valores de PO<sub>2</sub> en LCR antes del desclampaje (en el período de isquemia): grupo 1 (n = 12 animales), la PO<sub>2</sub> alcanzó 0 kPa; grupo 2 (n = 9), los valores de PO<sub>2</sub> variaron entre 0 kPa y el 50% del estado previo al clampaje; grupo 3 (n = 10), PO<sub>2</sub> ≥ 50% del estado previo al clampaje.

En los cálculos estadísticos, para la comparación entre grupos, se utilizó la prueba de la U de Mann-Whitney, y para las medidas repetidas la prueba de Wilcoxon para datos apareados. Todos los valores se expresan como medias ± error estándar de la media. Se consideró estadísticamente significativo un valor de p < 0,05.

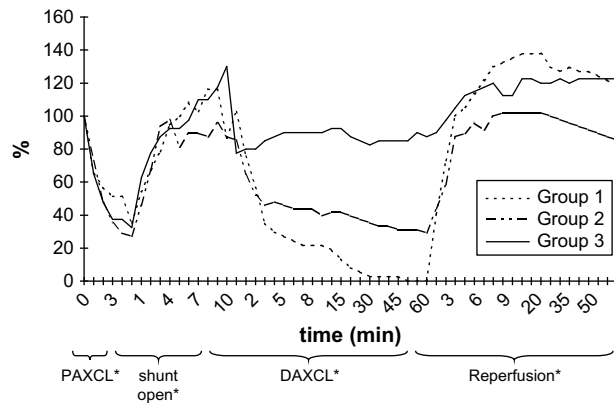
## RESULTADOS

En la *tabla I* y en las *figuras 2 y 3* se resumen las alteraciones de los valores de PO<sub>2</sub> y PCO<sub>2</sub> en LCR después del clampaje aórtico proximal. Durante el período de 5 min, la PO<sub>2</sub> en LCR disminuyó un 46-71% comparado con los valores basales en los tres grupos. El valor más bajo fue de 71 ± 6% en el segundo grupo. En 24 animales (77%) se observó, como mínimo, una disminución del 50% de la PO<sub>2</sub> en LCR. Sólo en el 32% de los animales estos valores disminuyeron hasta el 25% de los basales. Después del clampaje aórtico proximal en todos los animales el tiempo hasta alcanzar el valor más bajo máximo de PO<sub>2</sub> en LCR fue de 3,2 ± 0,3 min. Durante el inicial, no se observó un aumento significativo de la PCO<sub>2</sub> en LCR (período isquémico de 5 min).

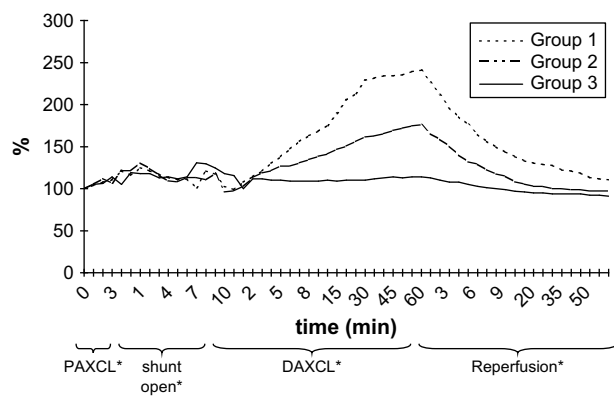
Durante la perfusión aórtica distal a través del *shunt*, antes de la aplicación del segundo clampaje aórtico, los valores de PO<sub>2</sub> y PCO<sub>2</sub> en LCR fueron ligeramente más bajos que los basales. Las alteraciones en LCR observadas durante el período inicial de 5 min después de la aplicación del segundo clampaje aórtico fueron similares a las obtenidas tras el clampaje aórtico proximal (*tabla II*, *figs. 2 y 3*). En el grupo 1, la PO<sub>2</sub> en LCR disminuyó hasta 0 kPa después de 16,7 ± 4,8 min. En los grupos 1 y 2 se observó un aumento de PCO<sub>2</sub> en LCR de, como mínimo, un 200% con un aumento gradual continuo durante el período de clampaje de 60 min.

En todos los grupos, los valores de PO<sub>2</sub> en LCR aumentaron durante el período de reperfusión (*tabla III*, *fig. 2*). El aumento máximo se observó en el grupo 1, en el que fue significativamente mayor que en los otros grupos de acuerdo con el período de doble clampaje aórtico (p = 0,003). Cuando comparamos el período de reperfusión, la diferencia entre grupos no fue estadísticamente significativa de acuerdo con el período basal. Al término del período de reperfusión, los valores de PO<sub>2</sub> seguían siendo más altos que las determinaciones obtenidas en el período basal (p < 0,05).

El pH de LCR no mostró cambios significativos después del período inicial de clampaje proximal de 5 min (*tabla I*). Durante el doble clampaje aórtico, se observó una disminución gradual y progresiva del pH en los grupos 1 y 2 y, al término del período de reperfusión, en estos grupos, las



**Fig. 2.** Alteraciones de la PO<sub>2</sub> en LCR como porcentaje de acuerdo con el valor basal. DAXCL: doble clampaje aórtico; PAXCL: clampaje aórtico proximal. \*p < 0,05 entre grupos.



**Fig. 3.** Alteraciones de la PCO<sub>2</sub> en LCR como porcentaje de acuerdo con el valor basal. DAXCL: doble clampaje aórtico; PAXCL: clampaje aórtico proximal. \*p < 0,05 entre grupos.

determinaciones siguieron siendo más bajas que los valores basales ( $p > 0,05$ ) (fig. 4).

Según lo determinado mediante la sonda de láser Doppler, el FME disminuyó durante el clampaje proximal de 5 min y aumentó tras el flujo de *shunt*. El flujo sanguíneo disminuyó y, más tarde, aumentó durante los períodos de isquemia y reperfusion puesto que el O<sub>2</sub> reaccionó de acuerdo con los grupos de isquemia del estudio. Durante los períodos de isquemia, en los grupos 1, 2 y 3, respectivamente se alcanzaron disminuciones máximas del 67,2%, 39,3% y 24,6% (fig. 5). Para alcanzar niveles máximos, se requirieron 30-60 min.

## DISCUSIÓN

Para la detección de isquemia de la médula espinal durante la cirugía de *bypass* aórtico toracoabdominal

se han propuesto diversos métodos de monitorización intraoperatoria pero ninguno ha obtenido una aplicación generalizada<sup>4</sup>. Svensson et al<sup>5</sup> describieron el uso de un electrodo de platino intratecal en una tentativa de identificar los vasos que irrigan la médula espinal durante la inyección intraaórtica de iones hidrógeno. A pesar de la prometedora experiencia inicial, tanto experimental como clínica, el método no se ha evaluado en series a mayor escala.

Wadouh et al<sup>6</sup> determinaron directamente la PO<sub>2</sub> de la superficie de la médula espinal en cerdos, tras el clampaje aórtico torácico, y describieron que la causa de la lesión de la médula espinal era una deficiencia de O<sub>2</sub> distal a la oclusión. Mediante un catéter montado en balón intraaórtico, Ishizaki et al<sup>7</sup> determinaron la tensión de O<sub>2</sub> intratecal, epidural y en la médula espinal con un espectrómetro de masas rígido en perros, en los que se produjo una isquemia graduada en la médula espinal. Estos autores describieron que la concentración intratecal y epidural de O<sub>2</sub> reflejó con precisión su contenido en la médula espinal. Sugirieron que la determinación intratecal de PO<sub>2</sub> podría usarse como un nuevo indicador de isquemia de la médula espinal durante la oclusión aórtica. Recientemente, el mismo grupo ha descrito la monitorización de la tensión intratecal de O<sub>2</sub> durante la oclusión aórtica en perros para identificar las arterias nutricias de la médula espinal<sup>8</sup>. La perfusión selectiva de estas arterias mejoró la tensión intratecal de O<sub>2</sub> y los potenciales evocados raquídeos, que la isquemia disminuyó significativamente. Los autores señalaron que la principal preocupación de la monitorización de la tensión de O<sub>2</sub> en LCR era la sonda de PO<sub>2</sub>. Era una sonda rígida, no apropiada para su utilización en humanos debido al riesgo de lesión de la médula espinal durante su inserción. Destacaron la necesidad de desarrollar sondas blandas y flexibles.

Los primeros estudios publicados por Wadouh et al<sup>6</sup> e Ishizaki et al<sup>7</sup> sobre el uso de la determinación de la tensión de O<sub>2</sub> en la médula espinal durante la oclusión aórtica torácica propiciaron que evaluáramos la aplicación de un nuevo catéter flexible multiparamétrico para la monitorización continua de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> y pH en LCR durante la oclusión aórtica experimental en cerdos. Previamente hemos descrito diversos aspectos de la monitorización de oxígeno en LCR<sup>9</sup>. El catéter intratecal utilizado en el presente estudio se ha usado clínicamente durante años para la monitorización en línea de los gases en sangre arterial<sup>10</sup>. Se ha validado usando un análisis convencional de gases sanguíneos y se ha demostrado una correlación apropiada. También se ha utilizado en otros lugares, sobre todo con objetivos de investigación<sup>11,12</sup>.

**Tabla II.** Determinaciones de los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, y pH en líquido cefalorraquídeo (LCR) como cambios del 25%, 50% y 100% de acuerdo con los valores basales y tiempos de reacción después de doble clampaje aórtico

Parámetros en LCR en los diversos grupos	Alteraciones en min (n)				
	25%	50%	100%	Máximo	Cambio máximo (%)
<b>PO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	0,9 ± 0,2 (12)	2,9 ± 1,1 (12)	—	16,7 ± 4,8 (12)	0,0* (12)
Grupo 2	2,2 ± 0,5 (9)	9,4 ± 3,0 (9)	—	26,9 ± 7,5 (9)	-74,8 ± 3,5* (9)
Grupo 3	4,0 ± 2,8 (6)	2,0 ± 1,0 (2)	—	19,0 ± 5,0 (10)	+12,7 ± 18,9* (10)
Todos	2,1 ± 0,7 (27)	5,4 ± 1,4 (23)	—	21,2 ± 3,6 (31)	-64,8 ± 8,9 (31)
<b>PCO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	5,8 ± 1,6 (12)	10,3 ± 3,6 (11)	16,8 ± 3,1 (9)	49,8 ± 5,0 (12)	+247,2 ± 18,8* (12)
Grupo 2	7,3 ± 1,6 (8)	17,1 ± 5,6 (6)	25,7 ± 11,4 (3)	44,3 ± 5,9 (9)	+202,0 ± 31,0* (9)
Grupo 3	8,3 ± 3,4 (3)	30 (1)	—	34,5 ± 10,1 (10)	-3,2 ± 5,8* (10)
Todos	6,6 ± 1,1 (23)	13,6 ± 3,0 (18)	19,1 ± 3,6 (12)	44,2 ± 3,8 (31)	+95,8 ± 17,2 (31)
<b>pH</b>					
Grupo 1	—	—	—	45,1 ± 5,8 (12)	-9,8 ± 1,2* (12)
Grupo 2	—	—	—	45,1 ± 5,9 (9)	-7,7 ± 1,9* (9)
Grupo 3	—	—	—	48,6 ± 7,7 (10)	+0,1 ± 0,8* (10)
Todos	—	—	—	45,9 ± 3,6 (31)	-6,7 ± 1,1 (31)

\*p &lt; 0,05.

**Tabla III.** Determinaciones de los valores de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub>, y pH en líquido cefalorraquídeo (LCR) como cambios del 25%, 50% y 100% de acuerdo con los valores basales y sus tiempos de reacción durante la reperfusión

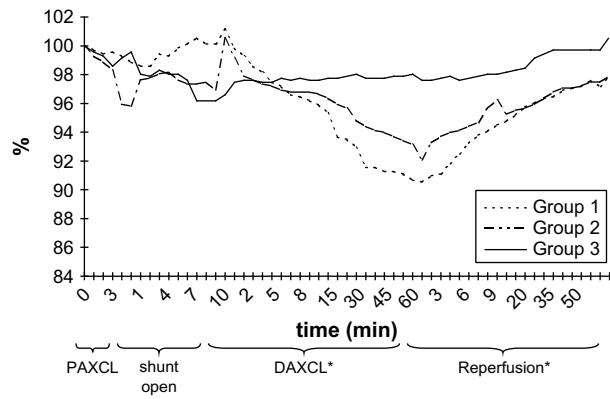
Parámetros en LCR en los diversos grupos	Alteraciones en min (n)				
	25%	50%	100%	Máximo	Cambio máximo (%)
<b>PO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	1,1 ± 0,3 (12)	2,2 ± 1,3 (12)	—	16,2 ± 4,6 (12)	+70,2 ± 18,4* (12)
Grupo 2	2,5 ± 2,0 (8)	3,1 ± 2,1 (8)	1,8 ± 0,7 (7)	21,2 ± 7,0 (9)	+12,9 ± 11,8* (9)
Grupo 3	3,9 ± 1,3 (7)	12,4 ± 9,3 (4)	2,5 ± 1,5 (2)	21,7 ± 4,5 (10)	+66,9 ± 44,9* (10)
Todos	2,3 ± 0,7 (27)	4,1 ± 1,7 (24)	2,0 ± 0,6 (9)	19,4 ± 3,3 (31)	+47,3 ± 13,6 (31)
<b>PCO<sub>2</sub></b>					
Grupo 1	8,7 ± 4,7 (11)	9,2 ± 1,3 (7)	—	50,5 ± 5,2 (12)	+15,4 ± 15,6* (12)
Grupo 2	3,9 ± 0,8 (6)	7,4 ± 1,4 (5)	—	42,9 ± 5,8 (9)	+9,0 ± 13,6* (9)
Grupo 3	4,6 ± 1,6 (2)	7,0 (1)	—	54,3 ± 4,2 (10)	-8,7 ± 5,5* (10)
Todos	6,8 ± 2,8 (19)	8,3 ± 0,9 (13)	—	48,4 ± 3,2 (31)	+7,5 ± 8,1 (31)
<b>pH</b>					
Grupo 1	—	—	—	52,7 ± 5,2 (12)	-2,3 ± 1,3 (12)
Grupo 2	—	—	—	50,7 ± 5,3 (9)	-1,9 ± 1,2 (9)
Grupo 3	—	—	—	55,6 ± 4,3 (10)	+1,2 ± 1,2 (10)
Todos	—	—	—	52,6 ± 2,9 (31)	-1,3 ± 0,8 (31)

\*p &lt; 0,05.

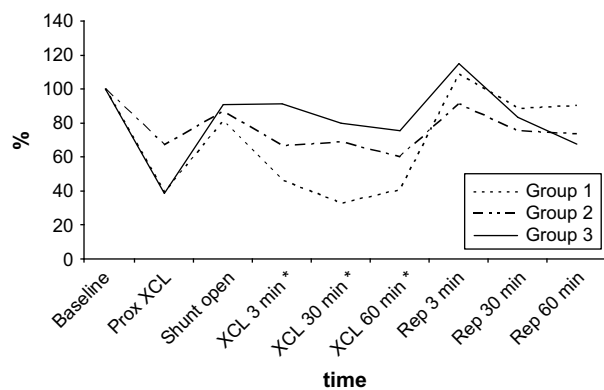
En el presente estudio, que incluyó algunos de los animales descritos previamente, se analizaron con detalle las alteraciones de PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> y pH en LCR con respecto al tiempo de reacción y al cambio máximo de cada parámetro derivado de la sonda Paratrend durante y después del clampaje aórtico.

Los resultados deben considerarse complementarios de nuestras observaciones previas.

Los resultados del presente estudio demostraron que, después de clampaje aórtico torácico, la PO<sub>2</sub> de LCR disminuyó hasta como mínimo el 50% de los valores basales en 1,7 ± 0,2 min (límites 0,5-5,7). El



**Fig. 4.** Alteraciones del pH en LCR como porcentaje de acuerdo con el valor basal. DAXCL: doble clampaje aórtico; PAXCL: clampaje aórtico proximal. \* $p < 0,05$  entre grupos.



**Fig. 5.** Alteraciones del flujo sanguíneo en la médula espinal (FME) como porcentaje de acuerdo con el valor basal. XCL: doble clampaje aórtico; Prox XCL: clampaje aórtico proximal. \* $p < 0,05$  entre grupos.

restablecimiento del flujo sanguíneo aórtico distal a través del *shunt* dio lugar a una respuesta rápida similar y a un aumento de los valores de PO<sub>2</sub> en LCR. No se observaron cambios significativos de la PCO<sub>2</sub> y el pH en LCR durante el período isquémico inicial de 5 min tras el clampaje aórtico, pero hubo un aumento gradual y progresivo de la PCO<sub>2</sub> y una disminución del pH durante el doble clampaje de 60 min. El grado de alteraciones de estos dos parámetros durante el clampaje aórtico prolongado se correlacionó con el grado de isquemia de la médula espinal evaluado mediante los valores más bajos de PO<sub>2</sub> en LCR antes del desclampaje. En animales con 0 kPa de PO<sub>2</sub> en LCR durante el clampaje se demostraron los mayores aumentos de PCO<sub>2</sub>.

La reperusión de la aorta dio lugar a una respuesta hiperémica, según lo observado con valores más altos de PO<sub>2</sub>, comparado con las determinaciones basales. Esta respuesta se observó incluso en animales, con

una disminución  $< 50\%$  de PO<sub>2</sub> en LCR después del clampaje aórtico (grupo 3, grupo de isquemia leve). Previamente, con microscopía electrónica, hemos demostrado imágenes normales o cambios leves de la médula espinal en animales similares<sup>2</sup>. Es probable que, incluso en la isquemia leve de la médula espinal con cambios reversibles, tenga lugar una respuesta hiperémica. Los hallazgos no demostraron una correlación clara entre el grado de isquemia de la médula espinal y el tipo de respuesta hiperémica.

El flujo sanguíneo de la médula espinal se correlacionó significativamente con la PO<sub>2</sub> de LCR, pero no alcanzó los niveles de PCO<sub>2</sub> y no reaccionó con la misma rapidez. De acuerdo con los resultados del presente estudio, la monitorización de la PO<sub>2</sub> en LCR es sensible y fiable para evaluar los cambios circulatorios en la médula espinal durante la oclusión arterial. Recientemente, Lips et al<sup>13</sup> documentaron que la determinación intratecal de PO<sub>2</sub> es una técnica de monitorización sensible para detectar los cambios en tiempo real de la oxigenación local de la médula espinal y que la monitorización continua de PO<sub>2</sub> en LCR podría aplicarse para la evaluación de pacientes en riesgo de isquemia de la médula espinal.

En conclusión, la monitorización intratecal de PO<sub>2</sub> es sensible para la evaluación de los cambios circulatorios en tiempo real en la médula espinal durante la oclusión aórtica y, debido a su rápida respuesta a la isquemia, podría usarse para la detección de las arterias segmentarias críticas durante el *bypass* aórtico. Se han programado estudios futuros para abordar la correlación entre la oxigenación intratecal y el desenlace neurológico durante la oclusión aórtica torácica experimental.

## BIBLIOGRAFÍA

- Christiansson L, Ulus AT, Hellberg A, Bergqvist D, Wiklund L, Karacagil S. New aspects of the spinal cord circulation as assessed by intrathecal oxygen tension monitoring during various arterial interruptions in the pig. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001;121:762-772.
- Hellberg A, Ulus AT, Christiansson L, et al. Monitoring of intrathecal oxygen tension during experimental aortic occlusion predicts ultrastructural changes in the spinal cord. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001;121:316-323.
- Hellberg A, Christiansson L, Ulus AT, Bergqvist D, Wiklund L, Karacagil S. A prolonged spinal cord ischemia model in pigs: passive shunting offers stable central hemodynamics during aortic occlusion. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2000;19:318-323.
- Wolozyn TT, Marini CP, Coons MS, Nathan IM, Jacobowitz IJ, Cunningham JN. A multimodality approach lengthens warm ischemic time during aortic cross-clamping. *J Surg Res* 1992;52:15-21.
- Svensson LG, Patel V, Coselli JS, Crawford ES. Preliminary report of localization of spinal cord blood supply by hydrogen during aortic operations. *Ann Thorac Surg* 1990;49:528-536.

6. Wadouh F, Arndt CF, Metzger H, Hartmann M, Wadouh R, Borst HG. Direct measurement of oxygen tension on the spinal cord surface of pigs after occlusion of the descending aorta. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1985;89:787-794.
7. Ishizaki M, Sugiyama S, Uchida H, Nawa S, Shimizu N. Intrathecal oxygen concentration as a new indicator of spinal cord ischaemia. *Acta Med Okayama* 1997;51:71-77.
8. Ishizaki M, Sugiyama S, Uchida H, Nawa S, Shimizu N. Identification and selective perfusion of the spinal cord-feeding arteries by intrathecal PO<sub>2</sub> monitoring for spinal cord protection. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 1999;18:17-24.
9. Christiansson L, Karacagil S, Thelin S, et al. Continuous monitoring of intrathecal PO<sub>2</sub>, PCO<sub>2</sub> and pH during surgical replacement of type II thoracoabdominal aortic aneurysm. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 1998;15:78-81.
10. Venkatesh B, Clutton-Brock TH, Hendry SP. A multiparameter sensor for continuous intra-arterial blood gas monitoring: a prospective evaluation. *Crit Care Med* 1994;22:588-594.
11. Clutton-Brock TH, Fink S, Markle D, Luthra AJ, Hendry SP. The evaluation of a new intravascular blood gas monitoring system in the pig. *J Clin Monit* 1994;10:387-391.
12. Jedlinska B, Mellström A, Hartmann M, Jönsson K. Comparison of tissue oxygen-tension measurements by different devices. An experimental study in pigs. *Scand J Clin Lab Invest* 1998;58:63-72.
13. Lips J, de Haan P, Bouma GJ, Holman R, van Dongen E, Kalkman CJ. Continuous monitoring of cerebrospinal fluid oxygen tension in relation to motor evoked potentials during spinal cord ischemia in pigs. *Anesthesiology* 2005;102:340-345.