

Parámetros fisiológicos y estado ácido-base en caballos que compiten en una carrera de enduro de 80 km a 2600 metros sobre el nivel del mar

Physiological parameters and acid-base status in horses competing in an 80 km endurance race at 2600 m above sea level

Claudia Valderrama Martínez^{1,3}, María Patricia Arias²

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar el comportamiento de algunos parámetros fisiológicos y caracterizar los cambios del estado ácido-base en caballos de enduro que compitieron en una carrera de 80 km a una altitud de 2600 msnm. Se tomaron muestras de sangre a 11 caballos antes de inicio (T0), al término (T1) y una hora después de finalizar la carrera (T2). Se determinaron los valores sanguíneos de variables determinantes del estado ácido-base, enzimas musculares, electrolitos, metabolitos, hematocrito y proteínas plasmáticas. Se determinaron los desórdenes ácido-base por medio de las aproximaciones de Henderson-Hasselbach y de Stewart y se calculó el cambio en el volumen plasmático. Se encontraron diferencias en las variables presión de CO₂, aniones buffer no volátiles, HCO₃⁻, proteínas plasmáticas, enzimas musculares, metabolitos, sodio, cloruro, potasio, calcio ionizado y fosfatos. Acidosis hiperlactatémica, alcalosis respiratoria, alcalosis de iones fuertes y acidosis de aniones buffer no volátiles fueron los desórdenes ácido-base presentados. Los resultados no fueron diferentes a los reportados en estudios realizados a menos de 1000 msnm, lo cual permite concluir que una altitud de 2600 msnm podría no afectar el desempeño atlético en caballos de enduro.

Palabras clave: ejercicio submáximo prolongado, alteraciones electrolíticas, diferencia de iones fuertes, altitud

¹ Grupo de Investigación en Ciencias Biomédicas y Veterinarias, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad De La Salle, Bogotá, Colombia

² Grupo de Investigación Inca-Ces, Línea de Investigación Fisiología del Ejercicio, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Ces, Medellín, Colombia

³ E-mail: ccvalderrama@unisalle.edu.co

Recibido: 14 de enero de 2020

Aceptado para publicación: 12 de agosto de 2020

Publicado: 25 de noviembre de 2020

ABSTRACT

The aim of this study was to determine some physiological parameters and characterize the changes of the acid-base state in enduro horses that competed in an 80 km race at an altitude of 2600 m above sea level. Blood samples were taken from 11 horses before the start (T0), at the end (T1) and one hour after the end of the race (T2). Blood values of variables determining the acid-base state, muscle enzymes, electrolytes, metabolites, hematocrit and plasma proteins were determined. Acid-base disorders were determined using the Henderson-Hasselbach and Stewart approximations and the change in plasma volume was calculated. Differences were found in the variables of CO₂ pressure, non-volatile buffer anions, HCO₃⁻, plasma proteins, muscle enzymes, metabolites, sodium, chloride, potassium, ionized calcium and phosphates. Hyperlactatemic acidosis, respiratory alkalosis, strong ion alkalosis and non-volatile buffer anion acidosis were the acid-base disorders presented. The results were not different from those reported in studies conducted at less than 1000 meters above sea level., which allows to conclude that an altitude of 2600 m may not affect athletic performance in enduro horses.

Key words: prolonged submaximal exercise, electrolytes alterations, strong ion approach, altitude

INTRODUCCIÓN

El enduro es la disciplina ecuestre más exigente en términos de resistencia o fondo. En las carreras se pone a prueba la habilidad del jinete para manejar la resistencia y el desempeño del caballo sobre una distancia que va desde los 80 hasta los 160 km a campo traviesa en contra de las condiciones climáticas y del terreno (FEI, 2020).

Durante el ejercicio submáximo un caballo puede perder hasta 15 L de sudor en una hora (Marlin y Nankernis, 2002), dependiendo de las condiciones climáticas. El sudor del caballo es hipertónico con respecto al plasma, con una osmolaridad que oscila entre 490 y 565 mOsm/l, y con una alta cantidad de aniones tales como cloro, bicarbonato, sulfatos y fosfatos (Viu *et al.*, 2010; Hodgson *et al.*, 2014). Como consecuencia de la sudoración profusa, se desencadenan estados de deshidratación moderada a severa con pérdida predominante de electrolitos, acompañada de desequilibrios del estado áci-

do-base que conllevan a la eliminación del caballo durante las competencias o posterior a ellas, ante la presentación de complicaciones metabólicas.

Los desórdenes del estado ácido-base han sido ampliamente descritos en caballos de enduro anteriormente, mediante la aplicación de la ecuación tradicional de Henderson-Hasselbach (Rose *et al.*, 1979) y más recientemente, a través de la aproximación fisicoquímica de Stewart, que describe las alteraciones ácido-base según los cambios en las concentraciones de electrolitos, proteínas, otros metabolitos, y la presión de dióxido de carbono (pCO₂), los cuales se afectan durante y después del ejercicio de alto rendimiento (Viu *et al.*, 2010).

Se sabe que la PCO₂ aumenta durante la actividad física como consecuencia de una mayor producción tisular por parte del músculo esquelético (Hodgson *et al.*, 2014), como también se incrementa a grandes alturas en respuesta a la hipoxia tisular (Bradley, 2010). Aún no ha sido esclarecido si los equinos res-

ponden a la baja presión atmosférica de oxígeno como lo hacen los humanos, los bovinos y otras especies (Bradley, 2010), encontrándose a la fecha estudios con resultados contradictorios. De Aluja (1968) y Wickler y Anderson (2000) describen que en respuesta a una altitud de 3800 msnm se produce policitemia, mientras que Collins y Farrelly (1969) no encontraron tal respuesta a 3300 msnm; sin embargo, no se ha determinado a partir de qué altitud se da este tipo de adaptación (Wickler y Anderson, 2000). En la revisión de literatura efectuada no se encontró estudios que evalúen los efectos de la altitud sobre algunos parámetros fisiológicos en caballos cuando se desempeñan en competencias de alto rendimiento, y si los desórdenes electrolíticos y del estado ácido-base que se presentan son diferentes de los descritos en caballos de enduro que compiten en ciudades con una altitud cercana a la del nivel del mar.

El presente estudio se realizó con el fin de determinar el comportamiento de algunos parámetros fisiológicos y caracterizar los desórdenes del estado ácido-base en caballos de enduro que compitieron en una carrera de 80 km a una altitud de 2600 msnm.

MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones Éticas

El presente estudio fue aprobado por el Comité de Ética para la Experimentación con Animales de la Universidad CES, según Acta 08 del 13 de mayo de 2014.

Protocolo de Estudio

El estudio fue realizado en una Carrera Nacional de Enduro de 80 km en el municipio de Bojacá, Cundinamarca, Colombia, a una altitud de 2600 msnm, una humedad relativa del 93% y una temperatura ambiental media de 13 a 14 °C (GOV.CO., 2020).

Se incluyeron 16 caballos de raza árabe y cruces de árabe, de los cuales ocho eran machos castrados y ocho eran hembras. Los animales tenían un promedio de 9 años y un rango de 6 a 11 años. Los criterios de inclusión fueron caballos que compitieran en la categoría 80 km jinetes adultos y 80 km jinetes jóvenes, y cuyos propietarios accedieron a participar después de haber sido informados sobre el estudio y firmar el consentimiento informado. Para el análisis, solo fueron incluidos aquellos caballos que terminaran el recorrido de 80 km; es decir, que no fueran eliminados en ninguna de las etapas por alteraciones metabólicas, músculo esqueléticas o de otro tipo. Todos los caballos fueron transportados desde varios municipios hasta el campo base 12-24 horas previas a la carrera.

Toma y Análisis de las Muestras

Por medio de venopunción, se obtuvo sangre yugular (10 ml) en tres momentos: la primera 1 h antes de la carrera (T0), la segunda, al terminar la carrera y después que salieron del último chequeo veterinario (T1), aproximadamente 20 minutos después de pasar la meta, y la tercera, 1 h después de haber finalizado la competencia (T2). Cada muestra fue dividida en dos tubos Vacutainer®, uno con EDTA y el otro sin anticoagulante. Inmediatamente después de la obtención de la muestra se realizó la medición de gases sanguíneos utilizando un analizador portátil de gases y electrolitos *I-Stat*® (Heska Corporation, Fort Collins, USA) para determinar pH, presión parcial venosa de CO₂ (PCO₂), presión parcial venosa de O₂ (PO₂), exceso de base (BE) y concentraciones de sodio [Na⁺], potasio [K⁺], calcio ionizado [Ca²⁺], cloro [Cl⁻], bicarbonato [HCO₃⁻], hemoglobina [Hb], hematocrito (Hto), nitrógeno ureico sanguíneo (BUN), creatinina, lactato y glucosa. Las muestras de sangre obtenidas en el tubo con anticoagulante fueron refrigeradas a 3 °C y transportadas al Laboratorio Clínico de la Universidad Nacional de Colombia para realizar hemograma

completo en un equipo *Nihon Kohden MEK-6450J* (Niho Kohden Corporation, Japón) y la medición de proteínas plasmáticas totales, fibrinógeno, globulinas y albúmina, mediante refractometría.

El suero obtenido se utilizó para la medición de fosfatos (Pi), creatinina quinasa (CK) y aspartato aminotransferasa (AST) mediante espectrofotometría, utilizando un equipo de química sérica *Vitros DT 60 II Módulo DTSC*.

Parámetros Calculados

El Anion Gap (AG) se calculó usando la ecuación descrita por Emmet y Narins (1977): $AG = (Na^+ + K^+) - (HCO_3^- + Cl^-)$.

El análisis cuantitativo del estado ácido-base se realizó usando las fórmulas descritas por Constable (1997). Para calcular la Diferencia de Iones Fuertes Medidos (SIDm, por su sigla en inglés), los buffers totales no volátiles (Atot) y la Brecha de Iones Fuertes (SIG) se utilizaron las siguientes fórmulas:
 $SIDm = (Na^+ + K) - (Cl^- + Lactato^-)$
 $Atot = 22.5 \times \text{albúmina} + 1.4 \times \text{globulinas} + 0.59 \times Pi$
 $SIG = (Atot / 1 + 10^{pKa - pH}) - AG$

Se tomó el valor de pK de 6.65 que fuera determinado para equinos por Constable (1997). Para calcular la variación en el volumen plasmático se utilizó la fórmula modificada de Van Beaumont (1972). El cálculo se realizó con base al cambio de la concentración plasmática de albúmina basal pre y pos-ejercicio.

$$\% \Delta PV = (100 / [100 - Alb_{pre}]) * 100 ([Alb_{pre} - Alb_{pos}] / Alb_{pos})$$

Desórdenes Ácido-Base

Para la aproximación de Hendersson-Hasselbach, se definió acidosis metabólica cuando la $[HCO_3^-]$ y el BE se encontraban por debajo del rango de referencia (24 mEq/l y -6

mEq/l, respectivamente); alcalosis metabólica cuando la $[HCO_3^-]$ y el BE se encontraban por encima del rango de referencia (30 mEq/l y +6 mEq/l), respectivamente. Se definió acidosis respiratoria cuando la pCO_2 tenía un valor superior a 53 mmHg y alcalosis respiratoria cuando era menor de 41 mmHg.

Se definió acidosis hiperlactatémica si el valor de lactato sanguíneo era mayor de 2 mmol/l. Para la aproximación fisicoquímica de Stewart se definió acidosis de iones fuertes (SID acidosis) cuando el valor de SIDm estaba por debajo del valor de referencia (35 mEq/l), acidosis de buffers no volátiles (Atot acidosis) si el valor de Atot estaba por encima del rango de referencia (15 mEq/l), alcalosis de iones fuertes (SID alcalosis) si el valor de SIDm estaba por encima del valor de referencia (38.5 mEq/l) y alcalosis de buffers no volátiles (Atot alcalosis) si el valor estaba por debajo del rango de referencia (12 mEq/l).

Análisis Estadístico

Se realizó estadística descriptiva para todas las variables y se determinó la normalidad de los datos. Para determinar las diferencias para cada variable en cada uno de los tiempos se usó la prueba de rangos múltiples de Tukey. Se determinó diferencia estadísticamente significativa con un valor $p < 0.05$.

RESULTADOS

De los 16 caballos que participaron en el estudio, 11 terminaron la carrera satisfactoriamente y sus datos fueron analizados. La velocidad promedio de carrera fue de 13.7 km/hora.

Se presentaron alteraciones del estado ácido-base en algunos caballos antes de la competencia. Como desórdenes simples al finalizar la carrera se presentaron SID acidosis, Atot acidosis y acidosis hiperlac-

Cuadro 1. Frecuencia de las alteraciones ácido base según el método de Henderson y Hasselbah y la aproximación de Stewart presentadas por 11 caballos participantes en una carrera de enduro de 80 km en tres momentos¹

Desorden ácido-base	T0	T1	T2
Acidosis hiperlactatémica	1	2	0
SID Acidosis	1	1	0
SID Alcalosis	3	0	0
Atot Acidosis	1	1	0
Atot Alcalosis	0	0	0
Alcalosis respiratoria + SID alcalosis	0	1	0
Atot acidosis + acidosis hiperlactatémica	1	2	0
SID alcalosis + alcalosis respiratoria + acidosis hiperlactatémica	1	0	0
SID alcalosis + Atot acidosis + acidosis hiperlactatémica	0	1	1
Alcalosis respiratoria + Atot acidosis + acidosis hiperlactatémica	0	0	3
Alcalosis respiratoria + SID acidosis + acidosis hiperlactatémica	0	0	1
Alcalosis respiratoria + SID acidosis + Atot acidosis + acidosis hiperlactatémica	0	0	1
Alcalosis respiratoria + SID alcalosis + Atot acidosis + acidosis hiperlactatémica	0	0	3
Alcalosis respiratoria + Atot acidosis	0	0	2

¹ T0: 1 h antes de la carrera; T1: al término de la carrera; T2: 1 h del término de la carrera

tatémica. Los demás desórdenes presentados fueron de tipo mixto. Todos los caballos mostraron desórdenes mixtos una hora después de haber finalizado la carrera (Cuadro 1). No hubo concordancia entre los resultados del análisis del estado ácido-base con los dos métodos aplicados. El Cuadro 2 presenta los promedios y desviación estándar, así como las diferencias estadísticas entre momentos de la toma de muestras de cada variable.

El promedio del cambio en el volumen plasmático fue de -4.51 ± 9.77 , con un rango de -21.79 a 11.53 . La medición de enzimas musculares mostró diferencia significativa

entre T0 y T1, T0 y T2 y T1 y T2, tanto para la CK como para la AST, al igual que el BUN y la creatinina. El Atot mostró un incremento significativo en T1 y T2 con respecto al valor en reposo. Las proteínas plasmáticas y la albumina mostraron diferencia significativa entre T0 y T1, y entre T0 y T2.

Entre los electrolitos, para el sodio y el cloro se demostró una disminución significativa en T1 y T2 con respecto a T0, mientras que para el ion potasio se observó una diferencia significativa en T1 con respecto al valor basal. El calcio mostró un incremento significativo en T1 y T2 en comparación con el

Cuadro 2. Valores de electrolitos, metabolitos y parámetros determinantes del estado ácido-base en 11 caballos participantes en una carrera de enduro de 80 km en tres momentos¹

Variable	Rango ¹	T0	T1	T2
pH	7.31 – 7.45	7.35 ± 0.033	7.39 ± 0.055	7.37 ± 0.044
pCO ₂	41–53 mmHg	43.18 ± 2.83	40.63 ± 5.93	36.93 ± 6.59
SIDm	35–38.5mmol/l	37.34 ± 2.79	39.57 ± 6.34	38.97 ± 2.79
AG	6–16 mEq/l	14.87 ± 3.08	18.62 ± 6.58	21.37 ± 10.08
Atot	12–15 mEq/l	13.80 ± 0.82 ^{ab}	15.14 ± 1.01 ^{ac}	26.86 ± 1.81 ^{bc}
SIG	-2–+6	-0.096 ± 0.25	-5.66 ± 5.88	1.63 ± 8.97
HCO ₃ ⁻	24–30 mEq/l	24.39 ± 1.68	24.86 ± 2.16	22.43 ± 2.8
BE	-6–+6	-1.09 ± 1.97	0.0 ± 2.23	-2.36 ± 2.54
Hto	32–52%	33.63 ± 9.96	33.27 ± 2.93	31.18 ± 4.68
Hb	11–19g/dl	11.42 ± 3.37	11.3 ± 0.98	10.6 ± 1.6
PPT	5.5–7.5g/dl	7.01 ± 0.46 ^a	7.60 ± 0.54 ^a	7.5 ± 0.58 ^b
Globulinas	2.0–3.5 g/dl	3.97 ± 0.29	4.43 ± 0.47	4.02 ± 0.49
Albúmina	2.6–3.8 g/dl	2.77 ± 0.26 ^a	2.91 ± 0.29 ^{ac}	3.14 ± 0.38 ^b
AST	150–400 U/l	245.5 ± 71.9 ^a	585.1 ± 122.2 ^{ac}	565.2 ± 137.9 ^{bc}
CK	100–300 U/l	295.1 ± 210 ^a	2919 ± 2228 ^{ac}	3020 ± 2317 ^{bc}
Creatinina	1.1–1.8 mg/dl	1.28 ± 0.22 ^a	1.96 ± 0.60 ^{ac}	1.92 ± 0.63 ^{bc}
BUN	8–27 mg/dl	29.27 ± 4.02 ^a	41.18 ± 5.09 ^{ac}	44.72 ± 5.09 ^{bc}
Lactato	-2 mmol/l	1.43 ± 0.66	2.66 ± 1.49	2.53 ± 0.97
Glucosa	70–140 mg/dl	116.5 ± 12.7	95.2 ± 29.9	107.5 ± 15.4
Na ⁺	133–144 mmol/l	141.6 ± 2.2 ^{ab}	138 ± 2.4 ^a	136.3 ± 2.5 ^b
Cl ⁻	94–104 mmol/l	106.8 ± 2.2 ^{ab}	97.8 ± 5.0 ^a	98.3 ± 4.9 ^b
K ⁺	3.2–4.2 mmol/l	3.96 ± 0.52 ^a	2.49 ± 0.46 ^a	4.10 ± 0.67 ^b
Ca ⁺² i	2.7–3.3 mmol/l	2.23 ± 0.82 ^{ab}	3.02 ± 0.16 ^a	2.91 ± 0.47 ^b
Pi	1.9–5.4 mmol/l	3.39 ± 0.31 ^{ab}	4.00 ± 0.38 ^a	3.91 ± 0.39 ^b

Valores con superíndices diferentes indican diferencia significativa (p<0.05)

¹ Soma *et al.* (1996), Constable (1997), Kingston (2004), Navarro *et al.* (2005)

valor en reposo. El fósforo inorgánico mostró un aumento significativo en T1 y T2 con respecto al valor basal (Cuadro 2).

DISCUSIÓN

De 16 caballos que participaron en el estudio, 4 (25%) fueron eliminados de la carrera y uno fue retirado del estudio por su

propietario. La proporción de animales retirados de la carrera fue inferior a valores de 43.4 y 51.4% reportados por Viu *et al.* (2010) y Nagy *et al.* (2013), aunque inferior al 18.9% reportado por Fielding *et al.* (2011). Las marcadas diferencias entre estudios pueden explicarse por las condiciones topográficas y climáticas y por el menor número de caballos empleados en el presente estudio.

Contrario a lo esperado, se observaron trastornos relacionados con el estado ácido-base en reposo en un alto porcentaje de caballos (72%). Luego de revisar la anamnesis del examen clínico general, esto puede explicarse por el extenso periodo de transporte desde la finca hasta el lugar de la competencia (6-8 horas), lo cual hizo que el tiempo de recuperación no fuera el suficiente para que los caballos consumieran una cantidad adecuada de agua y alimento antes de la carrera.

Al final de la competencia, 10 de los 11 caballos presentaron algún tipo de desequilibrio ácido-base y una hora después de la carrera, todos los caballos lo mostraron. La alcalosis respiratoria, la acidosis hiperlactatémica, la SID alcalosis y la Atot acidosis fueron los desórdenes más comúnmente presentados en esta competencia como parte de los trastornos mixtos. La alcalosis respiratoria pos-ejercicio es frecuente en caballos de deportes de larga duración, la cual se presenta por la hiperventilación en respuesta a un aumento del consumo de oxígeno (VO_2) durante el ejercicio y, por la necesidad de eliminar el exceso de CO_2 producido por el aumento del metabolismo muscular (Walker, 2009). En el presente estudio, solamente dos caballos presentaron alcalosis respiratoria al terminar la carrera (T1), pero todos presentaron alcalosis respiratoria compensada o no, acompañada de otras (trastornos mixtos) luego de una hora de recuperación. De otro lado, la SID alcalosis fue menos frecuente (36.3%), la cual se presentó en respuesta a la pérdida de altas concentraciones de cloro en el sudor, lo cual aumenta del SIDm (Kingston y Warwick, 1998; Boffi, 2006; Arias *et al.*, 2014).

La Atot acidosis observada en 54.5% de los caballos se debe al incremento en la concentración plasmática de albúmina, ya que esta aporta las 2/3 partes del valor de Atot y, al incremento en la concentración plasmática de fosfatos que contribuyó al aumento del Atot por encima de los valores de referencia. El incremento en el valor de fosfato se

ha reportado en otros estudios (Aguilera *et al.*, 2001; Sampieri, 2006; Larsson *et al.*, 2013).

No se dispone de muchos estudios que determinan el estado ácido-base en caballos de enduro usando el método cuantitativo o de Stewart (Hess *et al.*, 2005; Viu *et al.*, 2010); no obstante, los resultados concuerdan con los obtenidos por Viu *et al.* (2010), excepto por la alcalosis respiratoria como principal desorden respiratorio, toda vez que dichos autores encontraron la acidosis respiratoria como principal desbalance respiratorio, atribuyéndolo a una demora en la toma de la muestra de sangre.

La acidosis hiperlactatémica fue un trastorno con alta incidencia en el presente trabajo. Sin embargo, al analizar individualmente los valores de lactato, solo uno de los caballos presentó un valor por encima del umbral anaerobio (4.72 mmol/l), tres presentaron valores por debajo del umbral aerobio, y los demás estuvieron en la zona de transición (2-4 mmol/l); resultados similares a los reportados por Hess *et al.* (2005). Se ha descrito que la acidosis hiperlactatémica se presenta con mayor frecuencia en aquellos caballos que no cuentan con una buena preparación física, o en caballos sobreentrenados (Boffi, 2006).

El enduro es una disciplina deportiva de resistencia (larga duración y baja a moderada intensidad), en la cual predomina la activación del metabolismo aerobio para generar energía; sin embargo, el incremento en los niveles de lactato por encima del umbral aerobio (V_{150} o VL_2) o incluso sobre el umbral anaerobio (4 mmol/l, VL_4 o V_{200}) no es ajeno a este deporte (Boffi, 2006; Hodgson *et al.*, 2014).

La policitemia durante el ejercicio ha sido ampliamente descrita en caballos de diversas disciplinas ecuestres (Bos *et al.*, 2018). La contracción esplénica en respuesta a las catecolaminas ocasiona aumentos del

hematocrito a corto plazo para satisfacer la mayor demanda de oxígeno. El grado de policitemia varía con la edad y el nivel de entrenamiento del caballo, pero también es dependiente de la intensidad del ejercicio y del tiempo transcurrido entre la culminación de la actividad física y la toma de la muestra (Hodgson *et al.*, 2014; Bos *et al.*, 2018). El último factor puede explicar porque en este trabajo el hematocrito no mostró cambios significativos con respecto al valor basal, ya que las muestras de sangre se tomaron luego que los caballos pasaron el chequeo veterinario, habiendo transcurrido tiempo suficiente para que los glóbulos rojos liberados por el bazo volvieran a ser almacenados en el mismo. Los valores de hematocrito tanto basales como en los tiempos 1 y 2 se encontraban dentro del rango reportado para la especie (Hodgson *et al.*, 2014; Andriichuk y Tkachenko, 2017), lo que podría indicar que, por lo menos a la altura de 2600 msnm, los caballos no responden a la baja presión barométrica de oxígeno haciendo policitemia y que durante el ejercicio, la respuesta esplénica al ejercicio logra compensar esta baja presión.

Las proteínas plasmáticas totales mostraron una tendencia al aumento al finalizar el ejercicio (7.5%) con respecto a los valores basales. Esto es explicable por la hemoconcentración que se presenta como consecuencia de la pérdida de agua por sudoración y evaporación. Los resultados fueron similares a los reportados en otras investigaciones (Cywinska *et al.*, 2013), aunque menores al 25% descrito por Boffi (2006) en caballos que compiten en enduro.

Se sabe que durante el ejercicio, el balance de las fuerzas de Starling es afectado por un incremento en las presiones hidrostáticas arterial y venosa, lo que aumenta el flujo de plasma hacia el intersticio. Al finalizar el ejercicio, parte del fluido que había pasado al espacio intersticial, retorna hacia el compartimiento vascular por vía linfática, pero otra fracción importante se pierde por sudoración, lo cual resulta en una disminución del volumen plasmático (Hodgson *et al.*, 2014; Bos

et al., 2018). En el presente estudio se observó una pérdida de volumen plasmático del 4.5% al calcularse mediante la fórmula de Beaumont, con un incremento de la concentración de albúmina del 5.1% al finalizar el ejercicio. Masri *et al.* (1990) describieron un descenso del volumen plasmático del 13% y un aumento de las proteínas plasmáticas totales del 23% luego de una actividad física de alta intensidad y corta duración, atribuible a la sudoración.

Los metabolitos BUN y creatinina presentaron un aumento significativo ($p < 0.0001$ y $p < 0.001$, respectivamente) al final del ejercicio y durante la recuperación con respecto a los valores basales; similar a lo observado por Larsson *et al.* (2013). El mayor uso de la fosfocreatina y el incremento de la gluconeogénesis provocan un incremento de ambos metabolitos, y la disminución de la tasa de filtración glomerular acentúa estos cambios (Bos *et al.*, 2018).

Las enzimas musculares CK y AST también incrementaron luego de la competencia, al igual que lo descrito en otros estudios (Viu *et al.*, 2010; Larson *et al.*, 2013). En este sentido, Valberg (2018) reportó un incremento en las enzimas musculares en respuesta al ejercicio debido a un aumento en la permeabilidad del miocito como consecuencia de la dada durante el ejercicio prolongado, en tanto que Williams *et al.* (2004) encontró una correlación entre el aumento de la permeabilidad muscular y el incremento acumulado de la peroxidación lipídica de la membrana ocurrido durante el ejercicio, como consecuencia del estrés oxidativo.

Se observó una disminución significativa de las concentraciones de sodio ($p < 0.0001$), cloro ($p < 0.001$) y potasio ($p < 0.0001$), lo cual concuerda con lo descrito por otros autores (Hess *et al.*, 2005; Sampieri *et al.*, 2006; Muñoz *et al.*, 2010; Viu *et al.*, 2010), lo cual se explica por la pérdida de iones durante la sudoración (McCutcheon y Geor, 1996; Kingston y Warwick, 1998; Arias *et al.*, 2014; Hodgson *et al.*, 2014). La composición de

iones en el sudor varía con la intensidad y la duración del ejercicio, produciéndose un sudor más rico en sales en los ejercicios de larga duración como el enduro (Boffi, 2006). Hess *et al.* (2005) reportaron un incremento de K⁺ inmediatamente después del ejercicio (muestra tomada antes de los 2 minutos después de finalizado el ejercicio). En el presente estudio, el potasio, a diferencia de otros iones, mostró un aumento significativo ($p < 0.01$) en la recuperación con respecto al final del ejercicio, posiblemente debido al consumo de heno al finalizar la competencia; comportamiento similar a lo descrito por Sampieri (2006) a las dos horas de haber finalizado el ejercicio: No obstante, Hess *et al.* (2005) reportaron una disminución de K⁺ a los 30-60 minutos pos-ejercicio, debido al rápido movimiento del ion hacia el interior de la célula y hacia la orina.

El calcio ionizado mostró un incremento significativo al final de la carrera, pero dentro de los valores referenciales, al igual que lo reportado por Muñoz (2010), pero contrario a lo reportado por otros autores (Aguilera Tejero *et al.*, 2001; Sampieri *et al.*, 2006; Viu *et al.*, 2010). Los cambios en la concentración del calcio libre se deben analizar con respecto al calcio total, desafortunadamente, por razones técnicas, esta variable no se determinó en el presente estudio.

En general, se observó que los cambios de las variables hematológicas y los desórdenes ácido-base que presentaron los caballos del presente estudio no fueron muy distintos de los que se han descrito en los caballos que compiten en carreras que se llevan a cabo por debajo de 1000 msnm (Viu *et al.*, 2010). La utilización de la aproximación fisico-química de Stewart para determinar el pH permitió describir de una manera más completa los desórdenes del estado ácido-base luego de una actividad física sub-máxima de larga duración.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que a 2600 msnm no se presentan alteraciones ácido-base ni electrolíticas severas asociadas al ejercicio de larga duración y, que por lo tanto, esta altura podría no tener una influencia negativa sobre el desempeño atlético de los caballos de enduro.

LITERATURA CITADA

1. **Aguilera-Tejero E, Estepa JC, López I, Bas S, Garfia B, Rodríguez M. 2001.** Plasma ionized calcium and parathyroid hormone concentrations in horses after endurance rides. *J Am Vet Med Assoc* 219: 488-490. doi: 10.2460/javma.2001.219.488
2. **Andriichuk A, Tkachenko H. 2017.** Effect of gender and exercise on haematological and biochemical parameters in Holsteiner horses. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 101: e404-e413. doi: 10.1111/jpn.12620
3. **Arias MP, Mejía G, Ruiz OA. 2014.** Concentración de electrolitos en el sudor del Caballo Criollo Colombiano. *Rev CES Med Vet Zootec* 9: 43-51.
4. **Boffi F. 2006.** Fisiología del ejercicio en equinos. Buenos Aires: Inter-Médica. 322 p.
5. **Bos A, Compagnie E, Lindner A. 2018.** Effect of racing on blood variables in Standardbred horses. *Vet Clin Pathol* 47: 625-628. doi: 10.1111/vcp.12666
6. **Bradley K. 2010.** Cunningham's textbook of veterinary physiology. Blacksburg, VA: Elsevier. 656 p.
7. **Cywinska A, Szarska E, Degorski A, Guzera M, Gorecka R, Strzelec K, Kowalik S, Schollenberger A, Winnicka A 2013.** Blood phagocyte activity after race training sessions in Thoroughbred and Arabian horses. *Res*

- Vet Sci 95: 459-464. doi: 10.1016/j.rvsc.-2013.04.020
8. **Collins JD, Farrelli BT. 1969.** Changes in the number and quality of erythrocytes in horses transported to high altitudes. *Irish Vet J* 23: 42-46
 9. **Constable PD. 1997.** A simplified strong ion model for acid-base equilibria: application to horse plasma. *J Appl Physiol* 83: 297-311. doi: 10.1152/jappl.1997.83.1.297
 10. **de Aluja AS, Gross DR, McCosker PJ, Svedsen J. 1968.** Effect of altitude in horses. *Vet Rec* 82: 368-372.
 11. **Emmet M, Narins RG. 1997.** Clinical use of the anion gap. *Medicine* 56: 38-543.
 12. **FEI Endurance Rules. 2020.** [Internet]. Disponible en: <https://inside.fei.org/fei/disc/endurance/rules>
 13. **Fielding CL, Meier CA, Balch OK, Kass PH. 2011.** Risk factors for the elimination of endurance horses from competition. *J Am Vet Med Assoc* 239: 493-498. doi: 10.2460/javma.239.4.493
 14. **GOV.CO. Alcaldía Municipal de Bojacá. 2020** [Internet]. Disponible en: <http://www.bojaca-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
 15. **Kingston, J. 2004.** Appendices. In: Hinchcliff K, Kaneps A, Geor R (eds). *Equine Sports Medicine and Surgery*: London: Saunders. p 1295-1301.
 16. **Hess TM, Kronfeld DS, Williams CA, Waldron JN, Graham-Thiers PM, Greiwe-Crandell K, Lopes M, et al. 2005.** Effects of oral potassium supplementation on acid-base status and plasma ion concentrations of horses during endurance exercise. *Am J Vet Res* 66: 466-473. doi: 10.2460/ajvr.2005.66.466
 17. **Hodgson DR, McKeever K, McGowan C. 2014.** *The athletic horse*. 2nd ed. St. Louis, MO: Elsevier. 397 p.
 18. **Kingston JK, Warwick MB. 1998.** Effect of exercise on acid-base status of horses. *Vet Clin N Am-Equine* 14: 61-73. doi: 10.1016/S0749-0739(17)30212-2
 19. **Larsson J, Pilborg PH, Johansen M, Christophersen MT, Holte A, Roepstorff L, Olsen LH, et al. 2013** Physiological parameters of endurance horses pre-compared to post-race, correlated with performance: a two race study from Scandinavia. *ISRN Vet Sci* 2013: 684353. doi: 10.1155/2013/684353
 20. **Marlin D, Nankervis K. 2002.** *Equine exercise physiology*. Oxford: Blackwell Science. 296 p.
 21. **Masri M, Freestone JF, Wolfsheimer KJ, Shoemaker K. 1990.** Alterations in plasma volume, plasma constituents, renin activity and aldosterone induced by maximal exercise in the horse. *Equine Vet J* 22: 72-77. doi: 10.1111/j.2042-3306.1990.tb04739.x
 22. **McCutcheon LJ, Geor RJ. 1996.** Sweat fluid and ion losses in horses during training and competition in cool vs. hot ambient conditions: implications for ion supplementation. *Equine Vet J* 22: 54-62. doi: 10.1111/j.2042-3306.1996.tb05032.x
 23. **Muñoz A, Riber C, Trigo P, Castejón F. 2010.** Muscle damage, hydration, electrolyte balance and vasopressin concentrations in successful and exhausted endurance horses. *Pol J Vet Sci* 13: 373-379.
 24. **Nagy A, Murray JK, Dyson SJ. 2013.** Descriptive epidemiology and risk factors for eliminations from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons (2008-2011). *Equine Vet J* 46: 38-44. doi: 10.1111/evj.12069
 25. **Navarro M, Monreal L, Segura D, Armengou L, Añor S. 2005.** A comparison of traditional and quantitative analysis of acid-base and electrolyte imbalances in horses with gastrointestinal disorders. *J Vet Intern Med* 19: 871-877. doi: 10.1892/0891-6640(2005)19[871:-acotaq]2.0.co;2

26. **Rose RJ, Ilkiw J, Martin IC. 1979.** Blood-gas, acid-base and haematological values in horses during an endurance ride. *Equine Vet J* 11: 56-59. doi: 10.1111/j.2042-3306.1979.tb01300.x
27. **Sampieri F, Schott HC, Hinchcliff KW, Geor RJ, Cunilleras JE. 2006.** Effects of oral electrolyte supplementation on endurance horses competing in 80 km rides. *Equine Vet J* 38:19-26. doi: 10.1111/j.2042-3306.2006.tb05507.x
28. **Soma LR, Uboh CE, Nann L, Gerber AL. 1996.** Prerace venous blood acid-base values in standardbred horses. *Equine Vet J* 28: 390-396. doi: 10.1111/j.2042-3306.1996.tb03110.x
29. **Valberg SJ. 2018.** Disorders of the musculoskeletal system. In: Reed S, Bayley W, Sellon D. *Equine internal medicine*. 4th ed. St Louis: Elsevier. p 542-579.
30. **van Beaumont W. 1972.** Evaluation of haemoconcentration from haematocrit measurements. *J Appl Physiol* 32: 712-713. doi: 10.1152/jappl.1972.32.5.712
31. **Viu J, Cunilleras JE, Armengou L, Cesarini C, Tarancón I, Rios J. 2010.** Acid-base imbalances during a 120 km endurance race compared by traditional and simplified strong ion difference methods. *Equine Vet J* 42: 76-82. doi: 10.1111/j.2042-3306.2010.00213.x
32. **Walker A, Arent S, McKeever K. 2009.** Maximal aerobic capacity (VO_{2max}) in horses: a retrospective study to identify the age-related decline. *Comp Exerc Physiol* 6: 177-181. doi: 10.1017/S1755254010000073
33. **Wickler, SJ, Anderson TP. 2000.** Hematological changes and athletic performance in horses in response to high altitude (3,800 m). *Am J Physiol-Reg I* 279: 1176-1181. doi: 10.1152/ajpregu.-2000.279.4.R1176
34. **Williams CA, Kronfeldt DS, Hess TM, Saker KE, Waldron JN, Crandell KM, Hoffman RM, et al. 2004.** Antioxidant supplementation and subsequent oxidative stress of horses during an 80-km endurance race. *J Anim Sci* 82: 588-594. doi: 10.2527/2004.822588x