

FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO EQUINO. ANÁLISIS DE UNA EXPERIENCIA SOBRE TREADMILL DE ALTA VELOCIDAD

EQUINE EXERCISE PHYSIOLOGY. ANALYSIS OF AN EXPERIENCE ON HIGH SPEED TREADMILL

MARTÍNEZ R.*; CITTAR J.**; MATTIOLI G.**; CAVIGLIA J.**; GIULIODORI M.**; DESMARÁS E.**

Con motivo de la 5ª Reunión Anual de Cátedras de Fisiología Veterinaria Latinoamericanas celebrada en la Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad Nacional de La Plata, se planificó y ejecutó en las dependencias del Centro de Medicina Equina un protocolo demostrativo de ejercicio maximal, integrando simultáneamente variables cardio-respiratorias, bioquímicas y hematológicas.

Este Centro cuenta con un pabellón totalmente acondicionado e implementado para el estudio del rendimiento locomotivo del Equino Atleta. Incluye una unidad de plataforma rodante susceptible de modificar su velocidad y grado de inclinación, un moderno equipo para espirometría, calorimetría, registro electrocardiográfico y un completo laboratorio para los aspectos hematológicos, perfil bioquímico, análisis de gases y electrolitos sanguíneos.

El protocolo de ejercicio realizado en La Plata fue, sin lugar a dudas, al más alto nivel, similar al que conociéramos en el laboratorio de fisiología del ejercicio equino en la Facultad de Veterinaria de Uppsala; por esta razón, hemos estimado procedente difundir esta singular experiencia a los colegas especialistas en equinos del medio nacional y latinoamericano.

Se trabajó con un ejemplar equino inglés de carrera de 7 años de edad y 435 kg de peso, entrenado para correr sobre la cinta rodante y habituado al uso de una máscara conectada a medidores de gases y volúmenes respiratorios. Dos electrodos separados y ubicados en el eje eléctrico del corazón permitieron registrar el electrocardiograma de esfuerzo.

Las muestras de sangre fueron obtenidas por separado desde la vena yugular y arteria facial, empleando extensiones heparinizadas, en condición basal inicialmente y luego a las velocidades crecientes programadas previamente.

El ejercicio del caballo comenzó con un calentamiento previo, para optimizar la bioquímica energética muscular y la eficiencia cardiorrespiratoria, caminando sobre el treadmill (5,4 km/h), con 3 grados de inclinación, procediéndose luego a aumentar escalonadamente la velocidad hasta llegar a 54 km/h. Posteriormente se redujo la velocidad hasta volver a la inicial, como trabajo regenerativo favoreciendo una más acelerada homeostasis lactémica. Al final de cada velocidad, y antes de modificarla, se realizó la correspondiente toma de muestras sanguíneas arterial y venosa.

En las muestras venosas se determinó: Concentración de lactato mediante tiras reactivas "MB-Lactate" evaluadas en fotolorímetro de reflexión portátil "Accusport"; Glicemia con tiras reactivas "Glucostix" evaluadas en fotolorímetro de refracción portátil "Glucometer"; Proteínas Plasmáticas Totales mediante un refractómetro de Goldberg; Hematocrito con la técnica del microhematocrito; Electrolitos mediante fometría de llama.

Las muestras seriadas de sangre fueron enviadas de inmediato y adecuadamente al laboratorio de análisis de gases para medir pH, PO₂, PCO₂, concentración de hemoglobina, porcentaje de saturación de la hemoglobina, bicarbonato y electrolitos.

Mediante un equipo para estudios ergoespirométricos, provisto de una máscara nasal adaptada al trabajo ventilatorio equino, con un medidor de zirconio para las concentraciones de oxígeno y otro infrarrojo para cuantificar las concentraciones de CO₂, más una turbina de flujos, se recolectaron datos para procesarlos en un programa computacional que permitió medir el cociente respiratorio

* Fac. Ciencias Veterinarias y Pecuarias, Universidad de Chile;

** Fac. de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional de La Plata.

instantáneo, calorimetría indirecta y todas las variables relacionadas con los volúmenes y composición del aire desplazado en cada ciclo ventilatorio.

Los cambios experimentados por las variables respiratorias se observaron de inmediato tabulados y graficados en la pantalla del computador.

Para optimizar la simulación de un ejercicio maximal se dispuso además de un par de ventiladores gigantes, con el fin de favorecer el mecanismo de termólisis sudoral.

En la página siguiente (ver tabla de resultados) se muestra la tabulación de los cambios experimentados por algunas de las variables seleccionadas en el curso del experimento.

Velocidad. La velocidad de desplazamiento del piso rodante fue gradualmente aumentada, hasta que, por la inclinación positiva de 3 grados, pudo homologarse a un trabajo atlético maximal.

Análisis de los cambios de algunas variables fisiológicas en respuesta al ejercicio.

1. **Frecuencia cardíaca (F.C.).** Aumentó progresivamente junto al incremento de la velocidad hasta el nivel habitual de una carrera, obedeciendo al estado simpaticotónico del ejercicio, al crecido retorno venoso y al estímulo del incremento de la temperatura corporal actuando sobre el marcapaso cardíaco; con ello se aseguró el adecuado aumento del volumen minuto cardíaco para el trabajo en ejercicio.

2. **Frecuencia respiratoria (F.R.).** El aumento de los ciclos respiratorios –desde 35/min hasta 140/min– se explica esencialmente por la estimulación del centro respiratorio desde los receptores articulares, corteza motriz, el incremento de la kalemia que sensibiliza los quimiorreceptores a la PCO_2 y el descenso del pH sanguíneo. Llamó la atención en esta variable que el aumento de la frecuencia respiratoria junto al incremento de la velocidad –prácticamente la misma que en una carrera en pista– no hiciera disminuir el volumen corriente máximo (variable tratada más adelante). En nuestro experimento se registraron 140 ciclos respiratorios por minuto; es decir, si asumimos que hubo sincronización respiratoria y locomotiva, se habría llegado a 9,3 batidas cada 4 segundos, lo mismo que ocurre en un caballo que cruza la meta como ganador.

3. **Lactatemia.** Es posible que el valor real para cada muestra sea mayor al registrado debido a que las tiras reactivas para lactato recibieron muestras de sangre con hematocritos aumentados por la in-

eludible contracción esplénica del ejercicio, dejando disminuida la fracción plasmática que reacciona con la oxidasa láctica de la tira reactiva. Por esta razón, en esta ocasión sólo en el momento de la mayor velocidad se habría podido constatar un nivel de lactato cercano al punto de reversibilidad normal de un equino entrenado (4mM); posteriormente, apareció el incremento habitual postcarrera, lo que demuestra que el mecanismo de co-transporte para lactato y protones, desde músculo a intersticio y sangre, es lento y saturable.

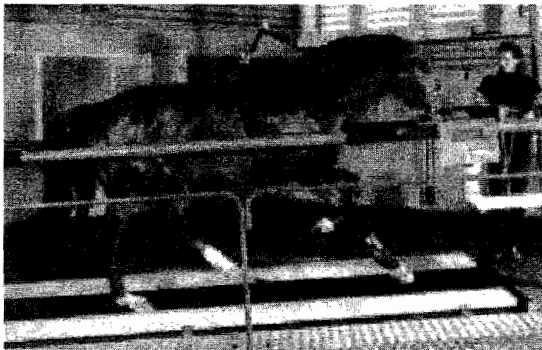
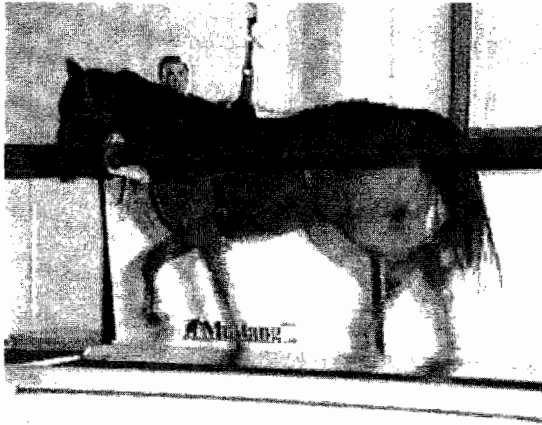
Pareciera importante confirmar a futuro si los bajos niveles de lactatos registrados con tiras reactivas de química seca son confiables con hematocritos superiores a 50%; efectivamente, existe un trabajo que confirmaría una muy buena correlación de este método con el de laboratorio usando kit específico para lactato y espectrofotómetro, pero aplicado a sangre humana, no así para equinos cuyo hematocrito aumenta por encima de 65% en ejercicio.

4. **Glicemia.** Constituyó uno de los principales objetivos de este trabajo. En nuestra experiencia del post ejercicio de equinos en pista de hipódromos habíamos constatado un significativo descenso de la glicemia en el muestreo inicial respecto al valor basal en pesebrera, pero habiendo transcurrido 3 a 5 minutos desde la pasada por la meta; es decir, medíamos tardíamente un fenómeno que podía ser más acentuado. De modo que, justificadamente, deseábamos conseguir una muestra de sangre durante la carrera misma, lo que sólo podía lograrse estando junto a un caballo corriendo sobre cinta transportadora. Efectivamente, como presumíamos, la glicemia alcanza valores inédita y sorprendentemente disminuidos, probablemente debido al transporte de glucosa a músculo (también a hígado); mucho mayor durante el ejercicio mismo.

El mayor consumo de glucosa por el músculo en trabajo debió tener relación con la mayor disponibilidad de transportadores Glut-4 sarcomerales. En la condición de reposo físico, estas proteínas transportadoras están ligadas citoplasmática y periféricamente al glicógeno, como envolviéndolo; la glicogenólisis adrenérgica en ejercicio las libera para luego emerger y ubicarse en la membrana celular. Es posible que este mayor transporte de glucosa, que también se realiza hacia hígado y cerebro, tenga relación con el fenómeno de redistribución de flujos, el que da en ejercicio perfusión preferencial a estos territorios, propiciando una mejor oferta y consumo de este metabolito energético. Cabe señalar que, a la luz del resultado de investigaciones publicadas, sería el

TABLA DE RESULTADOS
EJERCICIO MAXIMAL EQUINO SOBRE TREADMILL

KAMIKASE	Reposo	Caminando		Trote		Galope corto		Galope largo		Galope tendido		Galope fuerte		Trote		Caminando		Post ejercicio
		4 min	3 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	2 min	2 min	2 min	
7 años / 435 kg		1.5 m/seg	4.5 m/seg	6.5 m/seg	8.5 m/seg	10.5 m/seg	12.5 m/seg	15 m/seg	16.2 km/h	4.5 m/seg	4.5 m/seg	4.5 m/seg	4.5 m/seg	1.5 m/seg	1.5 m/seg	1.5 m/seg	2 min	2 min
VARIABLES		5.4 km/h	16.2 km/h	23.4 km/h	30 km/h	37 km/h	45 km/h	54 km/h	16.2 km/h	16.2 km/h	16.2 km/h	16.2 km/h	16.2 km/h	5.4 km/h	5.4 km/h	5.4 km/h	—	—
Velocidad (m/seg)		1.5	4.5	6.5	8.5	10.5	12.5	15	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	5.4	5.4	5.4	—	—
F.C./min.	32	59	105	115	120	150	180	204	206	206	206	206	206	130	130	130	90	90
FR./min.	12	35	60	80	120	125	135	140	135	135	135	135	135	99	99	99	78	78
Lactato (mM)	1.3	1.5	1.9	2	2.8	2.5	3.1	3.9	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	8.8	8.8	8.8	5.3	5.3
Glicemia (mg/dl)	81	55	54	47	49	28	32	26	26	26	26	26	26	55	55	55	37	37
V.G.A. art. %	44	50	52	55	59	57	65	68	66	66	66	66	66	70	70	70	68	68
P.P.T. (g/dl)	5.7	6	6.2	6.3	6.5	5.9	7	6.2	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	7	7	7	6.4	6.4
Kalemia venosa (mEq)	3.6	3.9	4.2	4.4	4.5	5.2	5.6	7.4	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7
Vol. Tidal (L)	—	2.54	5.61	5	6.06	7.37	8.43	9.59	9.36	9.36	9.36	9.36	9.36	5.73	5.73	5.73	—	—
FE _{O2} (Vol%)	—	16.94	16.6	16.08	15.76	15.1	15.14	14.88	16.77	16.77	16.77	16.77	16.77	18.38	18.38	18.38	—	—
FECO ₂ (Vol%)	—	3.56	4.07	4.4	4.69	5.34	5.6	6.49	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	3.75	3.75	3.75	—	—
F. Resp/min	—	33	71	116	123	128	134	138	98	98	98	98	98	120	120	120	—	—
VO ₂ (L/min)	—	3.2	16.66	27.31	37.75	53.72	63.88	78.42	38.82	38.82	38.82	38.82	38.82	16.64	16.64	16.64	—	—
VCO ₂ (L/min)	—	2.91	15.95	25.17	34.76	49.86	62.64	85.3	56.31	56.31	56.31	56.31	56.31	25.4	25.4	25.4	—	—
R (CR)	—	0.91	0.96	0.92	0.92	0.93	0.98	1.09	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.53	1.53	1.53	—	—
VENT. (L/min)	—	82.61	395.79	577.38	747.43	960.79	1126.56	1322.46	960.96	960.96	960.96	960.96	960.96	684.74	684.74	684.74	—	—
pH art.	7.39	7.42	7.44	7.43	7.42	7.39	7.32	7.2	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.2	7.2	7.2	7.18	7.18
pH ven.	7.37	7.4	7.41	7.4	7.39	7.39	7.3	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.16	7.16	7.16	7.15	7.15
Sat. O ₂ art. %	97	98	98	97	96	94	87	76	94	94	94	94	94	96	96	96	97	97
Sat. O ₂ ven. %	57	76	81	70	72	68	55	69	74	74	74	74	74	80	80	80	70	70
PO ₂ art. mmHg	98	101	99	88	84	70	57	49	87	87	87	87	87	98	98	98	101	101
PO ₂ ven. mmHg	31	41	45	37	38	37	32	26	59	59	59	59	59	54	54	54	46	46
PCO ₂ art. mmHg	43	42	37	37	38	39	42	45	31	31	31	31	31	22	22	22	19	19
PCO ₂ ven. mmHg	50	46	42	43	43	45	51	81	47	47	47	47	47	30	30	30	35	35
HCO ₃ art. mEq	26	26	25	24	24	23	21	17	11	11	11	11	11	8	8	8	7	7
HCO ₃ ven. mEq	28	28	26	26	25	25	24	26	16	16	16	16	16	10	10	10	12	12
Calcio plasm. mEq	4.54	4.90	4.12	4.07	3.57	3.78	3.28	4.85	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	2.25	2.25	2.25	3.6	3.6



confirmado aumento del potasio plasmático quien favorecería la estimulación respiratoria, así como la producción de un pulso de insulina y una mayor sensibilidad a ella en sus receptores, facilitando la función de los transportadores Glut-4. Esto abre una interesante ventana e incentivo para repetir el experimento constatando también los niveles simultáneos de insulina plasmática.

5. Volumen Globular Aglomerado o Hematocrito (VGA, %). Esta variable experimentó un claro incremento debido a la contracción esplénica por un mecanismo α -adrenérgico que contrae la musculatura lisa del bazo, exprimiendo su sangre de elevado hematocrito (80%) a la circulación; como consecuencia de ello, crece la capacidad de transporte para el oxígeno, pero con el inconveniente de aumentar la viscosidad de la sangre y el trabajo cardíaco, especialmente del corazón derecho, así como la resistencia de flujo por la pequeña circulación. "Kamikase" elevó su hematocrito hasta un 70%, valor superior al que habitualmente encontramos en la primera muestra post ejercicio en pista, ya declinando por haber transcurridos algunos minutos desde la culminación de la carrera; en este caso, el

muestreo sanguíneo practicado antes de finalizar cada etapa se hizo todavía en pleno ejercicio. Resulta claro que en el post ejercicio la recaptura globular esplénica es rapidísima.

6. Proteínas Plasmáticas Totales (PPT, g/dl). Como era de esperar, a medida que se intensificó la velocidad del piso rodante y el trabajo muscular, se pudo constatar un aumento de la concentración de proteínas plasmáticas, las que al no salir del compartimiento vascular, aumentaron su concentración relativa por la fuga de agua hacia el músculo hiperosmótico en trabajo, junto a la pérdida sudoral y respiratoria. Al respecto, cabe señalar que este proceso de redistribución acuosa, que edematiza y contribuye al mayor volumen del músculo en ejercicio, también constituye un impedimento compresivo para el libre flujo circulatorio. Pensamos que la ineludible liberación de hemoglobina desde los glóbulos rojos envejecidos, cuyas membranas no resisten el elevado trajín circulatorio en ejercicio, bien podría hacer crecer la presión oncótica para contrarrestar la fuga de agua hacia músculo. Si a ello sumamos que crece el transporte de oxígeno por la hemoglobina disuelta en plasma, entenderemos por qué comienza a usarse la "hemoglobina libre de estroma" como complemento ergogénico en deportistas. El presente y futuro de la ingeniería química en materia de sustitutos sanguíneos es impresionante.

7. Kalemia. Tal como estaba ya publicado, esta variable electrolítica creció significativamente junto al aumento de la velocidad de la cinta transportadora. Es sabido que mediante un mecanismo α -adrenérgico se favorece el transporte de potasio desde glóbulo rojo, hepatocito y músculo hacia el líquido extracelular, siendo este pulso de potasio plasmático quien favorecería tanto la estimulación respiratoria como la producción de insulina y una mayor sensibilidad a ella en sus receptores. Consecuentemente, el progresivo incremento del potasio plasmático observado en "Kamikase", paralelo con el aumento de la velocidad, coincidió con la gradual disminución de la concentración de glucosa sanguínea.

8. Volumen corriente. Expresa los litros de aire movilizados en cada ciclo respiratorio, lo que en el caso analizado fue creciendo a medida que aumentaban la carga atlética en velocidad y la frecuencia respiratoria, para declinar sólo en cuanto se volvió a la velocidad del trote y, especialmente, al momento de volver a caminar. Este hecho resulta particularmente interesante, por haberse descrito para el

equino una sincronización entre el avance de las extremidades anteriores, la aceleración propulsiva del tren posterior y la fase inspiratoria, por lo que el volumen corriente debió disminuir con el incremento de la velocidad y frecuencia respiratoria en plena carrera; situación que no ocurrió con este notable "Kamikase".

9. **FE O₂** (Vol %). Refleja el porcentaje de O₂ en el aire espirado. El medidor de zirconio de la máscara registró una leve pero segura declinación a medida que crecía el consumo por la mayor capacidad extractiva muscular en trabajo.

10. **FE CO₂** (Vol %). Expresa el porcentaje de CO₂ en el aire espirado. El medidor infrarrojo para este catabolito gaseoso mostró un aumento progresivo junto a la mayor velocidad de trabajo y metabolización de sustratos energéticos.

11. **VO₂** (L/min). Expresa los litros de oxígeno consumidos por minuto. En el experimento realizado se pudo advertir un incremento paralelo con el aumento de la velocidad, desde 7,3 cc hasta 180 cc por kg de peso y por minuto. Este significativo aumento demuestra la perfección de todo un complejo mecanismo para favorecer el elevado consumo de oxígeno implicado especialmente en el metabolismo energético de la fosforilación oxidativa mitocondrial del equino atleta. Si consideramos un equivalente calórico del oxígeno de 5 Kcal por litro de oxígeno consumido, para una mezcla de sustratos energéticos metabolizados, podemos afirmar que este equino gastó 2.173,9 Kcal en los 16 minutos controlados de ejercicio. Además, que a 54 km/h con 3 grados de inclinación positiva, se consumieron 78,4 litros de oxígeno, con un gasto energético de 392 Kcal por minuto.

Al terminar la prueba de esfuerzo y volver a caminar, en la fase regenerativa del ejercicio, pudo comprobarse la caída inmediata de esta variable, proporcional a la carga atlética enfrentada, pero no homologable con el consumo de oxígeno mostrado a la misma velocidad en el inicio del experimento; clara señal de que se contrajo una deuda de oxígeno desde el momento en que se registró el consumo máximo (VO₂ Máx.) y los minutos en que la carga atlética siguió creciendo.

12. **VCO₂** (L/min). Esta variable representa la producción de anhídrido carbónico en el proceso metabólico del ejercicio. Como se observa en la tabla de resultados, este metabolito respiratorio fue aumentando junto con la carga de trabajo, llegando a superar al volumen de oxígeno consumido, debido a la producción de CO₂ "extra", por la disocia-

ción del ácido carbónico resultante del tamponamiento del ácido láctico por el bicarbonato plasmático.

13. **Cuociente respiratorio (CR)**. Este interesante parámetro nos señala el tipo de sustrato energético que preferentemente se ha estado metabolizando. La relación resultante entre la comparación porcentual de los volúmenes de CO₂ producido y oxígeno consumido será cercano a 1 si el sustrato energético empleado es un carbohidrato, lo que generalmente ocurre cuando la demanda de oxígeno y de energía supera la disponibilidad (glicólisis anaeróbica de los velocistas), para aproximarse a 0,7 si el sustrato combustionado es lipídico preferencial; para esta última condición se debe disponer de una oxigenación tisular por encima de la necesidad metabólica, es decir, tratarse de un aliviado trabajo, contando con una eficiencia respiratoria.

En nuestro caso, este cuociente resultó ser inferior a 1 hasta que el caballo tuvo que enfrentar la velocidad máxima, demostrándose el progresivo incremento y uso de la vía glicolítica anaeróbica, para pasar a ser mayor que 1 cuando la velocidad y el consumo de oxígeno disminuyeron, y el consumo de oxígeno se empleaba sólo en saldar la deuda de oxígeno contraída, favoreciendo la regeneración de glicógeno, transformar el lactato en piruvato, perder calor y devolver el equilibrio iónico y homeostático en general.

14. **Ventilación pulmonar** (L/min). Esta variable tuvo un notable incremento junto al aumento de la carga en velocidad, lo que confirma que los equinos atletas disponen de un aparato respiratorio dotado de una gran adaptación funcional.

15. **pH arterial y venoso**. En las muestras de sangre enviadas al laboratorio de gases se pudo confirmar el efecto acidificante del ácido láctico producido por el trabajo muscular, con valores más bajos en las muestras venosas que en las arteriales, debido al intercambio gaseoso pulmonar, hasta un pH de 7,14.

16. **Saturación de Hb por oxígeno**. A medida que disminuía la PO₂ por el mayor consumo del músculo en ejercicio y aumentaban la PCO₂ y la temperatura corporal, fue liberándose el oxígeno desde la hemoglobina, dado que en estas condiciones resulta menor la afinidad entre ambos. Por la misma razón resultó mayor la desaturación de la hemoglobina en las muestras de sangre venosa, de acuerdo con la capacidad extractiva tisular.

17. **PO₂ arterial y venoso** (mm de Hg). La presión parcial del oxígeno fue disminuyendo con el

incremento de la velocidad y mayor consumo de oxígeno muscular, lo que fue más acentuado en la sangre venosa.

18. **PCO₂ arterial y venosa** (mm de Hg). Ambas disminuyeron inicialmente para luego crecer especialmente en la sangre venosa, señal de que la combustión de sustratos energéticos creció al máximo a 54 km/h, no obstante la hiperventilación del ejercicio y velocidad de difusión de este metabolito gaseoso. Se sumó a este incremento metabólico el CO₂ producido por la disociación del H₂CO₃ proveniente del tamponamiento del ácido láctico por el bicarbonato plasmático.

19. **Bicarbonato arterial y venoso**. Se pudo advertir una significativa disminución del bicarbonato plasmático al ejercer su función tampón con el ácido láctico producido y, a consecuencia de ello,

creció simultáneamente la PCO₂ ante la disociación del ácido carbónico resultante.

20. **Calcio plasmático** (mEq/L). Se pudo apreciar una significativa disminución a medida que se intensificaba el trabajo en velocidad. Esto se debería a una serie de factores, incluyéndose una menor disponibilidad de calcio iónico circulante ante un secuestro muscular, la unión con las proteínas plasmáticas (especialmente la albúmina), con lactato y fosfato, junto a las pérdidas sudorales.

Este laboratorio de fisiología del ejercicio está además capacitado para establecer el diagnóstico y causa de muchísimas patologías que afectan el rendimiento del equino atleta.

Felicitaciones al Profesor Eduardo Desmarás y su magnífico grupo de trabajo.