

REAL ACADEMIA DE DOCTORES
DE ESPAÑA

**¿POR QUÉ EL CABALLO ES
CONSIDERADO ESPECIE
ATLÉTICA?**

DISCURSO PRONUNCIADO EL
EXCMO. SR. DR. D. FRANCISCO CASTEJÓN MONTIJANO
EN EL ACTO DE UN TOMO DE POSICIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO
EL DÍA 11 DE OCTUBRE DE 2023

Y CONTESTACIÓN DEL
EXCMO. SR. DR. D. ALBINO GARCÍA SACRISTÁN



Ediciones DON FOLIO

Medina Azahara, 15
14005 Córdoba

Autores:

Francisco Castejón Montijano

Depósito Legal:

I.S.B.N. :

Imprime:

Copisterías Don Folio S.L.
Medina Azahara, 15
14005 Córdoba

Reservados todos los derechos.

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los autores, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

¿POR QUÉ EL CABALLO ES CONSIDERADO ESPECIE ATLÉTICA?

EXCMO. SR. DR. D. FRANCISCO CASTEJÓN MONTIJANO

CATEDRÁTICO DE FISIOLÓGÍA
FACULTAD DE VETERINARIA
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



ÍNDICE.

AGRADECIMIENTOS Y JUSTIFICACIÓN	9
I. INTRODUCCION.....	15
Competiciones deportivas	15
Objeto de investigación.....	17
Cualidades de los caballos	18
II. CARACTERÍSTICAS ATLÉTICAS DEL CABALLO.....	25
II.1 Metabolismo energético muscular.....	25
II.1.1. Sistema anaerobio	26
II.1.2. Sistema aerobio.....	27
II.1.3 Almacenamiento de energía en el organismo	29
II.1.4. Adaptación de la fuente de energía al tipo de trabajo que se realiza.	31
II.1.5 Interacción de los sistemas aerobios y anaerobios du- rante el ejercicio.	34
II.1.6 Índices de rendimiento metabólico	36
II.2.Sistema respiratorio	39
II.2.1. Ventilación pulmonar.	40
II.3. Sistema cardiovascular	46
II.4. Hematología y bioquímica sanguínea	48
II.4.1 Funciones de los Eritrocitos.....	49
II.4.1.1 Transporte de oxígeno.....	49
II.4.1.2 Transporte de anhídrido carbónico.	51
II.4.2 Las plaquetas	52

II.4.3 Los glóbulos blancos o leucocitos	53
II.4.4 Respuesta al ejercicio.....	53
II.4.5. Plasma Sanguíneo	54
II.5 Sistema muscular.	56
I.5.1 Actividad enzimática muscular.	58
II.6. Sistema locomotor.	59
II.7. Termorregulación.....	63
I.7.1 Termorregulación durante el ejercicio	67
I.7.2. Efecto de la temperatura ambiente.	68
II.8. Selección genética	69
III. REFERENCIAS	71
BIBLIOGRÁFICAS	71

AGRADECIMIENTOS Y JUSTIFICACION

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España Excmas Señoras y Señores Académicos.
Señoras y Señores.

“Una predestinación, al parecer ciega, como tantos otros hechos y acciones de la naturaleza o del hombre, me trae ante vosotros, honrado y exaltando mi insignificancia con vuestro prestigio y nombradía, abillantando con el reflejo de vuestros saberes la humildad de los míos; pero casi todas esas predestinaciones que nos parecen ciegas, algún día, en alguna ocasión, algún sabio descubrimiento, halla la ley de su existencia, mas vaga o más concreta, pero inexorable.

Y la expresión cierta de la presunta ceguera que aquí me ha traído hoy, está en la ley de la gratitud que a todos nos rige, también en grado distinto, según multitud de factores, sensibles u ocultos, que informan todas las leyes”

Con estas bellas palabras dio comienzo su lectura de ingreso en esta academia hace 54 años mi abuelo Rafael Castejon y Martínez de Arizala, al que yo quiero dar reconocimiento público por su buen hacer y el ejemplo que dio a todos los miembros de su familia y en especial a mí, desde que fui niño.

Mi abuelo Rafael fue el iniciador de la saga de veterinarios y catedráticos de universidad de la familia a la que yo me honro en pertenecer. El año 1921 consiguió la cátedra de Enfermedades Infecciosas y Parasitarias de la en aquel entonces Escuela Superior de Veterinaria de Córdoba, perteneciente a la Universidad Hispalense de Sevilla, de la que fue su director el 17 de septiembre de 1930. Sus conocimientos, no solo de la asignatura de la que era titular, sino de la Etnología de los animales domésticos como de la historia de Córdoba y de sus monumentos y demás ramas de las humanidades, hacía que sus clases en la universidad se llenaran de alumnos de todos los cursos de la licenciatura de veterinaria. Uno de ellos, y quizás de sus discípulos, más distinguidos, fue el Excmo. Sr. D. Luis Mardones Sevilla miembro que fue de esta academia, así como director de la misma. Su contacto con mi abuelo en su época de estudiante de Veterinaria, así como en su etapa de profesor auxiliar de la cátedra, quizás fuera uno de los motivos que lo influenció a la hora de su elección de discurso de ingreso en esta academia sobre la figura de Almanzor, el gran caudillo árabe de la época del califa de Córdoba Hissen II

Con ocasión de la visita a Córdoba del Ministro de Instrucción Pública, mi abuelo Rafael fue el encargado de enseñarle las ruinas de la antigua ciudad de los califas de Medina Azahara, y la Yeguada Nacional de Moratalla de la que había sido director durante varios años; le preguntó asombrado de sus conocimientos que como podía saber tanto de cosas tan dispares como las ruinas y los caballos, a lo que mi abuelo le contestó: “los hombres son hijos del medio en el que han nacido, y al haber nacido en Córdoba y en Córdoba hay ruinas y caballos, pues esos eran los temas a los que se había dedicado.

En mi vida, mi especial dedicación no ha llegado al estudio de las ruinas, como hizo mi abuelo, solo se ha centrado en el estudio

del caballo, tanto en el ámbito personal, familiar y deportivo, como académico, de aquí que mi discurso de ingreso haya querido dedicarlo al estudio de las características fisiológicas que hacen del caballo un atleta por excelencia con respecto a otras especies también consideradas atléticas.

Quiero dar las gracias a todos los académicos de esta Real institución que me han acogido con benevolencia, dentro de su seno para acrecentar mi espíritu crítico y mis conocimientos, a través del respaldo que me concedieron con su voto.

Expresar mi especial gratitud a los académicos que me dieron su confianza y presentaron mi candidatura. Excmo. Sr. D. Albino García Sacristán de la sección 10^a de Veterinaria, al Excmo. Sr. D. José Manuel Cuenca Toribio de la sección 2^a de Humanidades y al Excmo. Sr. D. José María Marín Quemada de la sección 7^a de Ciencias Políticas y de la Economía.

De forma especial quiero manifestar mi especial agradecimiento al director de la sección 10^a de esta academia Excmo. Sr. D. Emilio Espinosa Velázquez, Catedrático de Cirugía y Reproducción de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza, al vicepresidente Excmo. Sr. D. Albino García Sacristán, Catedrático de Fisiología de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid, gran amigo y compañero, y que además tengo el gran placer de recibir de su docta pluma, la respuesta a mi discurso de ingreso de esta Academia, y al secretario de la misma, Excmo. Sr. D. Arturo Anadón Navarro, también gran amigo y compañero, que de forma conjunta me propusieron para ocupar una plaza de Académico numerario. Mi gratitud a los catedráticos de la Facultad de Veterinaria que me formaron, y de forma especial a los que se les dio en llamar “los siete magníficos”; profesores D. Diego Jordano Barea, D. Sebastián Miranda Entrenas, D. Manuel Medina Blanco D. Francis-

co Santisteban García D. Gaspar Gómez Cárdenas, D. Manuel Pérez Cuesta y mi propio padre D. Francisco Castejón Calderón. También quiero expresar mi gratitud al Prof. Dr. D. Pedro Carda Aparici, catedrático de Patología General y Patología Medica de la Facultad de Veterinaria de Madrid, que dirigió, no solo mi tesis doctoral en la Universidad Complutense de Madrid, si no también mis primeros pasos por la universidad española. Al Prof Robert L. Hamlin, DVM y PhD de la Universidad Estatal de Ohio, que me acogió en su departamento durante el tiempo en que disfrute de mi beca Fullbright. De igual forma quiero expresar mi gratitud a la Profa. Dra. Ana Muñoz Juzado por su dedicación a la docencia y a la investigación en el mundo del caballo, con la que yo he mantenido una estrecha colaboración en la etapa más fructífera de investigación dentro del Centro de Medicina Deportiva Equina de la Universidad de Córdoba, del que ahora es su directora.

Mi agradecimiento más profundo a mis padres, por su educación en los valores morales y espirituales, de esfuerzo, honestidad, y amor al trabajo, y de una forma especial a mi padre Francisco, Catedrático de Fisiología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba que me precedió en la cátedra; por todos sus desvelos consejos y enseñanzas. A mi mujer la Profa. Dra. Cristina Riber Pérez, Catedrática de Patología Quirúrgica y Cirugía de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba, compañera infatigable en todos los aspectos de mi vida, consejera, amiga y confidente, por su dedicación constante no solo a mi sino también a sus hijos. A su lado he tenido una vida plena de felicidad. A mis hijos Francisco y Cristina trabajadores incansables y excelentes personas, de los que me siento plenamente orgulloso. Les deseo lo mejor en la vida venidera y que no dejen de trabajar con constancia y espíritu de superación.

Debo y quiero rendir homenaje y ensalzar la figura del académico que ha sido mi antecesor en ocupar la medalla nº20 de esta

Academia, el Excmo. Sr. D. Luis Mardones Sevilla. Para mí, el ocupar la medalla que antes llevo Luis Mardones representa un alto honor, dada su talla personal y profesional, así como una satisfacción entrañable, dado como ya he anunciado antes, por su vinculación a la familia Castejon. Mi abuelo recordaba en su discurso de contestación al Dr. Mardones: “cuando en los últimos años de carrera, siendo jefe del SEU en Córdoba y dentro de lo que se denominó “movimiento de la universidad en el trabajo manual” encabezó un grupo de estudiantes trabajadores para realizar las excavaciones de los “Baños Califales de Córdoba” con un resultado excelente”. Con mi padre, también mantuvo un excelente contacto, tanto en su etapa de alumno aventajado, como posteriormente durante su etapa de Presidente del Consejo General de Colegios Veterinarios de España, ocupando el Dr. Mardones la plaza de Secretario General. A todo esto, se une la circunstancia de haber estado casado con María Dolores Morales Barberan, una cordobesa de pura estirpe, que lo hacía venir a Córdoba en diversas ocasiones por motivos familiares.

Luis Mardones en su etapa de estudiante fue un alumno aventajado. Durante su etapa de bachillerato en el Colegio San Idelfonso de Santa Cruz de Tenerife, terminó sus estudios con Matrícula de Honor en el examen de grado de reválida. Durante su licenciatura de Veterinaria, obtuvo veintiocho sobresalientes con veintiséis matrículas de honor. En el examen de licenciatura tuvo la calificación de Sobresaliente con Premio Extraordinario de Licenciatura. Con esas calificaciones alcanzo el Premio Nacional fin de carrera (1963), y el Víctor de Plata al mérito profesional. El doctorado lo realizo en la Facultad de Veterinaria de Córdoba con la tesis “Diagnostico serológico de la toxoplasmosis en animales domésticos en España” con la calificación de Sobresaliente Cum Laude, alcanzando posteriormente el Premio Extraordinario de Doctorado.

En 1966 fue nombrado Secretario General del Consejo Gene-

ral de Colegios Veterinarios de España, como ya he reseñado antes.

En 1966 ingreso por oposición en el Cuerpo Nacional Veterinario. En septiembre de ese mismo año obtuvo por oposición la plaza de Profesor Adjunto de Anatomía y Embriología de la Facultad de Veterinaria de Madrid.

Está en posesión de la Cruz de Caballero de la Orden de Cisneros, y de la Orden Civil del Mérito Agrícola.

En 1970 fue Gerente del Polo de Desarrollo Industrial de Córdoba, y en diciembre de 1971 se le nombra Subdirector General de Sanidad Animal del Ministerio de Agricultura. En tiempos en los que fue ministro de Agricultura Luis Lamo de Espinosa fue nombrado Subsecretario de dicho ministerio.

Ingresó como Académico Numerario de esta Real Academia, el 22 de mayo de 1972. Su discurso de ingreso tuvo por título. “Abu’amir Muhammad Ben Abi’-amir Al-ma’afiri (Almanzor), en el colapso y desintegración del califato hispano-omeya de Al-andalus” que fue contestado por mi abuelo Rafael Castejon y Martínez de Arizala.

Durante los años 2011 y 2012 colaboro con la RADE con algunas publicaciones como: Comunicación y relación. Las Vías Pecuarias; Longevidad y calidad de vida; Crisis económica de valores. Fue nombrado Académico de Honor en 2018.

En definitiva, hay que decir que en la profesión veterinaria alcanzo en breve plazo, puestos, honores y preminencias a los cuales sirvió con la devoción laboriosa de quien sirve a su país. En pocos años Mardones alcanzo relieve nacional, Sus relaciones interminis-

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

teriales, sus colaboraciones con técnicos de todo orden, tuvieron en Mardones uno de sus más altos valores para el desempeño de cargos designados por el Gobierno de la Nación, como fueron su desempeño de Gobernador Civil de Lérida y posteriormente de Tenerife. También fue diputado en Cortes durante 16 años, primero con la UCD y luego por el Grupo Coalición Canaria en el Congreso. Murió el 16 de diciembre de 2018. Sin ninguna duda, podemos decir que la profesión veterinaria perdió uno de sus mejores hijos.

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

1. INTRODUCCIÓN

De todas las especies animales, el caballo es una de las especies consideradas atléticas, además, de, el hombre, el perro y el camello. Para que a una especie animal se le considere atlética, se necesita en primer lugar que realice pruebas de ejercicio o competiciones deportivas, y, en segundo lugar, que sea objeto de investigación en mayor o menor grado para mejorar sus prestaciones. La especie humana ha sido la que ha despertado mayor interés, el perro y el camello las que menos, ocupando el caballo una posición intermedia.

Competiciones deportivas

Las carreras realizadas por el hombre y el caballo tuvieron un mismo origen en el transporte bien de mensajes o de mercancías. En la época antigua, se utilizaban mensajeros que recorrían largas distancias, tanto a pie como a caballo, para dar noticias de sucesos que habían terminado con mejor o peor fortuna, lo que provocaba algunas veces la ira del General o del Emperador que recibía esta mala noticia y que podía, incluso, descargarse sobre el mensajero con mayor o menor severidad. En los Juegos Olímpicos griegos se realizaban carreras tanto de hombres como de caballos, costumbre que se conserva en los Juegos Olímpicos de la era moderna.

Los caballos, al ser domesticados, se fueron seleccio-

nando para cumplir una serie de diferentes funciones según las necesidades requeridas. De ahí surgieron las diferentes razas con diferente variedad de tipos y tamaños corporales. Los caballos pesados fueron dedicados a trabajos de fuerza como el tiro de carruajes, mientras que los caballos ligeros fueron seleccionados para la velocidad y la resistencia y han sido el origen del caballo de deporte.

A su vez el caballo de deporte ha sido seleccionado para la práctica de diferentes modalidades deportivas como la velocidad, la resistencia, el salto o la doma. Esta especialización ha llevado a formar el grupo de caballos denominados “Caballo Atleta”. El caballo pura sangre inglés de carreras (PSI) se considera como el prototipo del caballo atleta, su cruce con razas de caballos ligeros de los diferentes lugares y países de origen ha dado lugar a la formación de las diversas razas de caballos de deporte que una vez seleccionados para las diferentes especialidades deportivas forman también parte de la denominación de Caballo Atleta.

Se sabe que el origen de las carreras de caballos proviene de las realizadas en el desierto por los beduinos de oriente medio. Las primeras carreras de caballos conocidas se celebran en Inglaterra, en el siglo XVII, sobre distancias que oscilan entre las carreras de velocidad de 400 a 1600 metros y de medio fondo entra 3000 y 7000 metros.

Las carreras de resistencia se conocen en Europa sobre distancias de 80 a 160 Km y su origen proviene de las realizadas por jinetes militares del arma de caballería para probar la resistencia de los caballos empleados en las operaciones militares. En Andalucía, durante la guerra de Granada se empleaba frecuentemente una táctica de combate conocido como “tornafuye”, que consistía en cargas de caballería ligera para arrojar proyectiles al enemigo y después salir rápidamente para ponerse a salvo, o bien huir aparentemente derrotados, para atraer al enemigo a un paraje donde poder batirlo fácilmente, lejos del grueso

de sus fuerzas. Esta práctica realizada en la guerra de Granada requiere buenos caballos que estén bien entrenados. Para poder mantener caballos capaces de realizar estas prácticas, se idearon competiciones durante las épocas de paz, y de ahí surgen las carreras de resistencia de la era moderna. Se realizaron de diversos tipos como carreras de varios días (2 a 5-6) sobre distancias de entre 200 km hasta 600-800 Km, como la mítica realizada por el ejército austrohúngaro entre las ciudades de Budapest y Viena, de la que se dieron varias ediciones en la mitad del siglo XIX.

Las velocidades más altas registradas durante una carrera alcanzan los 75-80 Km/h en distancias cortas sobre 400m para el caballo cuarto de milla; de alrededor de 60 Km/h en carreras de 2000-2500 m para el Pura Sangre Inglés (PSI); de 20-25 Km/h para carreras de resistencia entre 80 y 160 km, en carreras de un solo día, y de 15-17 Km/h en las de varios días, para el caballo árabe o Angloárabe.

En las disciplinas de salto, doma y tiro de carruajes se emplean razas de caballos de sangre caliente europeas como el Pura Raza Española (PRE), el Angloárabe, el Silla Francés, el Hannoveriano, Westfaliano, Oldenburgo, Holsteiner, etc.

El camello se utiliza para carreras de resistencia en Australia y en los países del oriente próximo, sobre distancias que oscilan entre los 4 a los 10 Km, alcanzando velocidades de 36-40 Km/h. También se han registrado velocidades de 60 km/h aunque durante breves periodos de tiempo.

En el perro, se realizan carreras en pista (canódromos) sobre distancias que oscilan entre los 250 metros en velocidad, hasta los 600 o 1000 metros en fondo, alcanzándose velocidades máximas de 60 Km/h. En España y Portugal son muy populares las cacerías de

liebres con galgos en el campo en eliminatorias de dos en dos. El tiempo mínimo de carrera para que sea considerada válida es de dos minutos, y el máximo, hasta que los perros alcanzan la liebre o esta se escapa en algún matorral. También hay que mencionar las carreras de perros con trineo sobre la nieve, como la famosa carrera de Iditarod celebrada en Alaska donde corren durante diez a quince días. También hay que considerar en perros las competiciones de Agility, que están alcanzando un gran auge, consistentes en completar un circuito con una serie de obstáculos en un tiempo determinado junto a un guía humano.

Objeto de investigación

Los trabajos sobre fisiología del ejercicio en el caballo, se empezaron a principios del siglo XIX con los trabajos del fisiólogo veterinario Sir Frederick Smith (1890, 1896), relacionados con el gasto cardiaco y la alimentación. También en esa época hay que destacar los estudios realizados por Zuntz y Lehmann (1889), Zuntz (1896) y Zuntz y Hagemann (1898), sobre metabolismo energético. En la década de los años treinta del siglo pasado hay que destacar los trabajos de Brody y col. sobre el consumo de oxígeno, y Procter, 1934, sobre metabolismo energético. En los años sesenta Steel y col, estudiaron el sistema cardiovascular y más concretamente el electrocardiograma (ECG), para medir de forma indirecta el tamaño del corazón y usar este parámetro como medida de la capacidad atlética. Utilizaron el término “Heart Score”, que lo definieron como la media de la duración del complejo de despolarización ventricular o QRS de las tres derivaciones bipolares de los miembros. Vieron que el heart score tenía una correlación positiva con el dinero ganado en las carreras, por lo que lo consideraron un buen índice de rendimiento, basándose en la hipótesis de que la despolarización del miocardio ventricular sería más larga en aquellos caballos con un ventrículo de mayor tamaño. También hay que destacar en esa época los trabajos

realizados por Holmes (1966), Irvine (1958) y Karlsen (1964).

Persson (1967), fue el primero en utilizar la cinta rodante de alta velocidad en los estudios sobre fisiología del ejercicio en el caballo. Demostró, como el uso de la cinta rodante de alta velocidad, facilita el estudio del consumo de oxígeno durante un ejercicio extenuante, y estableció la relación entre consumo de oxígeno y trabajo realizado, en diferentes estados de entrenamiento. Los estudios con cinta rodante de alta velocidad estuvieron confinados al laboratorio de Dr. Persson hasta los años ochenta del siglo pasado. En la actualidad su uso se ha extendido a numerosos laboratorios de fisiología del ejercicio en el mundo. En nuestro laboratorio de Fisiología del ejercicio, de la Universidad de Córdoba, realizamos estudios con cinta rodante de alta velocidad desde el año 1998.

Cualidades de los caballos

Para realizar cada tipo de ejercicio los caballos deben reunir tres cualidades o características básicas, la resistencia, la velocidad

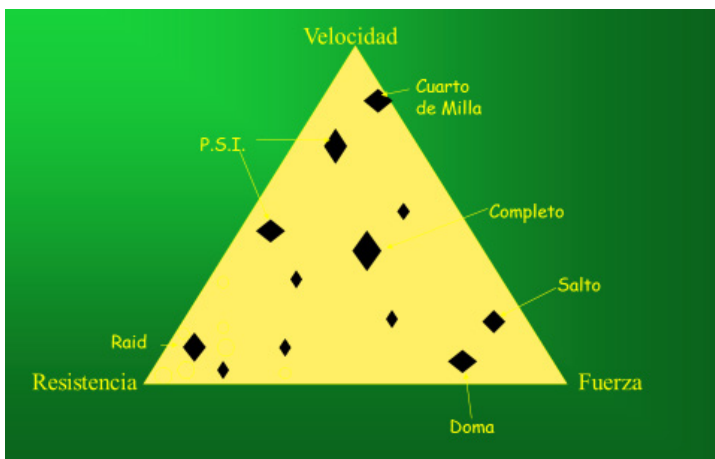


Fig. 1 Distribución de la diversas proporciones de velocidad fuerza y resistencia en las diversas disciplinas ecuestres.

y la fuerza, que combinadas en diversas proporciones nos muestran las cualidades de los diversos caballos a la hora de realizar cada una de las diversas disciplinas ecuestres.

Estas tres cualidades pueden representarse en un triángulo imaginario, situandolas en los vértices del mismo. Por ejemplo, podríamos situar la velocidad en el vértice superior del triángulo, la fuerza en el vértice inferior derecho y la resistencia en el vértice inferior izquierdo.

Los caballos especializados en velocidad se agruparían en el vértice superior, situándose los de velocidad pura, como los Cuarto de Milla, más próximos al vértice, los de medio fondo (resistencia) más próximos al lado izquierdo y los especialistas en carreras con pistas pesadas en el lado derecho; los agrupados en el vértice inferior derecho se encuentran los especialistas más idóneos en salto y en doma con individuos más próximos al lado derecho para los caballos de salto que requieren de su velocidad para ir más rápido, y de su fuerza para saltar más alto; en el vértice inferior izquierdo, los especialistas más idóneos en disciplinas de resistencia, situándose los especialistas en carreras sobre terreno llano en el lado izquierdo del triángulo, y los especialistas en carreras de montaña en el lado inferior del triángulo. Por último en el centro del triángulo, se situarían los caballos de concurso completo que para desempeñar su disciplina necesitan un equilibrio de las tres cualidades. (*Fig. 1*)

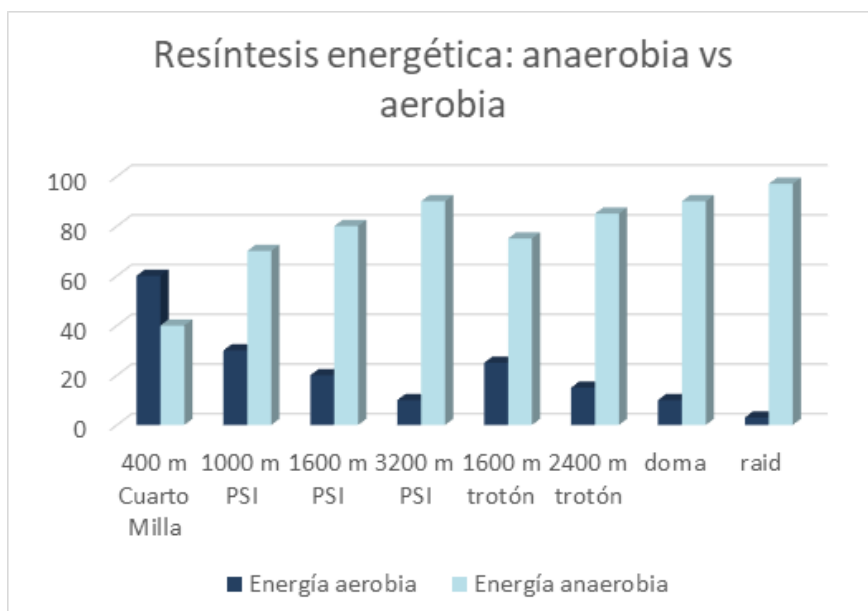
El rendimiento deportivo depende de dos grandes grupos de factores: extrínsecos e intrínsecos. Dentro de los factores extrínsecos, hay que considerar la nutrición, el herrado, el entrenamiento, la interacción del binomio jinete-caballo, la estrategia de competición y el estado de salud. Los factores intrínsecos son los que verdaderamente hacen del caballo un atleta excelente, representado por sus particularidades fisiológicas, como capacidad aerobia, anaerobia, ca-

racterísticas locomotoras y termorreguladoras.

Para conseguir un rendimiento óptimo en ejercicio, se requiere una resíntesis continua de energía en los músculos esqueléticos, al ser los encargados de generar el movimiento. Las demandas de energía durante el ejercicio se suplen, combinando en mayor o menor proporción la utilización de las vías aerobias y anaerobias, dependiendo de la intensidad y la duración del ejercicio, así como de las características propias de cada individuo. A mayor intensidad y menor duración del ejercicio, participa en mayor proporción el metabolismo anaerobio, mientras que a mayor duración y menor intensidad participará en mayor proporción el metabolismo aerobio. No existe un ejercicio puramente anaerobio o puramente aerobio, aunque de forma práctica se dice que un ejercicio es aerobio o anaerobio, cuando predomina una vía u otra. De forma general se puede decir que en el caballo, por sus características fisiológicas, existe un predominio del metabolismo aerobio sobre el anaerobio. Así, en una competición de 100 m lisos en atletas humanos, un 90% de la resíntesis energética muscular se produce mediante un metabolismo anaerobio, mientras que en un caballo Cuarto de Milla, en una carrera de 400 m (distancia equiparable a los 100 m para personas) a velocidad máxima, la resíntesis anaerobia supone un 60% y en un caballo PSI, en una carrera de 1000 m, la resíntesis anaerobia solo supone un 30%.

Esto nos indica que la capacidad aerobia o capacidad para captar, transportar y utilizar el oxígeno en el ejercicio es determinante en el caballo de deporte (Fig. 2). Por ello, el caballo destaca por una enorme capacidad aerobia máxima, asociada con una alta capacidad de almacenamiento de sustratos energéticos, especialmente de glucógeno, pero también de lípidos en sus fibras musculares, una vascularización muscular muy marcada y un alto grado de volumen mitocondrial en el músculo. A esto hay que unir la alta capacidad de

aumentar el transporte de oxígeno en la sangre hasta el músculo en contracción desde el inicio del ejercicio por la contracción esplénica, así como la capacidad de elevar la frecuencia cardíaca, que pasa des-



de valores de reposo de 20-40 lat/min a 240-250 lat/min en ejercicio máximo.

Fig 2 Participación proporcional del metabolismo aerobio- anaerobio en la resíntesis de ATP, dependiendo de la mayor o menor intensidad del ejercicio realizado.

Como factores también determinantes de su excelencia atlética, el caballo muestra una enorme eficiencia de su locomoción, particularmente en razas que compiten en resistencia, con un consumo energético reducido por km recorrido (denominado economía de carrera) y una termorregulación muy eficaz, con un umbral de sudoración bajo para promover la termólisis.

El mejor indicador de la capacidad aerobia, es la medida del consumo máximo de oxígeno (VO₂max.). Este parámetro representa la capacidad máxima que tiene un atleta para captar el oxígeno del medioambiente, transportarlo y utilizarlo en las células, fundamentalmente en las fibras musculares cuando su medición se lleva a cabo durante el ejercicio. En el hombre oscila entre los 69 y los 85 ml de O₂/Kg/min, mientras que en el caballo oscila entre 160 a 180 ml O₂/kg/min., habiéndose descrito un valor máximo de 220 ml/O₂/kg/min. Esto indica que en el caballo el VO₂max es de 2 a 2,5 veces más alto que en el hombre. El caballo tiene adaptaciones estructurales que aumentan la oxigenación de la sangre en los pulmones, la capacidad de transporte de oxígeno por la sangre y la facilidad de liberarlo a los tejidos.

La captación de oxígeno depende de la habilidad de transferir el oxígeno desde el aire a los alveolos pulmonares. Los PSI tienen un volumen tidal (volumen de aire en una respiración) de aproximadamente 12-15 litros y un volumen ventilatorio minuto (volumen de aire en un minuto) de 1600 L/min durante un ejercicio máximo. Esta gran capacidad ventilatoria se produce debido a presión diferencial entre el espacio pleural y el aire medioambiental. En la generación de esta presión diferencial intervienen tanto los músculos respiratorios como los músculos locomotores.

La difusión de oxígeno entre el alveolo y la sangre se consigue por la delgadez de la membrana alveolar y por la gran área superficial de la membrana del pulmón del caballo. El pulmón del caballo es dos veces el de una vaca que tiene un tamaño corporal similar y el área de la superficie de intercambio gaseoso es 1,6 veces el de una vaca. Además, la capacidad de transporte de oxígeno en el caballo se ve aumentada por la gran cantidad de hemoglobina de los eritrocitos del caballo y por el gran número de estos, que durante un esfuerzo máximo se aumentan considerablemente debido a la contracción esplénica. Esta contracción se produce de forma anticipatoria al ejercicio aumentando

el número de eritrocitos (Persson, 1967). Como resultado, se aumenta la concentración de hemoglobina, incrementando la capacidad de transporte de oxígeno por la sangre arterial hasta un 50% durante un ejercicio intenso. El efecto del bazo sobre la concentración de hemoglobina se acompaña de una reducción del volumen plasmático durante el ejercicio intenso (McKeever y col 1993a) El efecto beneficioso de la esplenocntracción se ha puesto de manifiesto al comparar caballos normales con caballos esplenectomizados (McKeever y col.1993b) En los atletas humanos, los valores de hematocrito en reposo oscilan entre un 40-50%, aumentando solo de forma ligera durante el ejercicio como consecuencia de una disminución de los fluidos corporales. Sin embargo, el caballo posee unos valores de hematocrito en reposo entre el 30-40%, aumentando de forma considerable después de un ejercicio máximo hasta valores de 60-70%.

Las propiedades de la fibra muscular también son características de rendimiento deportivo. Para la diferenciación de los distintos tipos de fibras musculares se han analizado las isoformas de la cadena pesada de la miosina (MyHC) expresada por cada fibra. De esta forma, se han identificado tres isoformas de la MyCH en el nivel proteínico del musculo del caballo, designadas como tipos I, IIA y IIX en estado puro y dos tipos intermedios, los tipos I+IIA y IIAX (Rivero y Piercy, 2007).

El cociente entre fibras tipo I y II está genéticamente pre-determinado con lo que eso puede predisponer a un individuo para una determinada actividad física. Los atletas de velocidad tienen una mayor proporción de fibras tipo II, mientras que los de resistencia tienen una mayor proporción de fibras tipo I al igual que ocurre en el caballo.

Asimismo el análisis de las actividades de enzimas musculares clave en las rutas metabólicas es un procedimiento habitual para

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

el estudio de las capacidades oxidativa y glucolítica del músculo, tanto en el hombre como en el caballo.

Además de la capacidad aerobia, el caballo también posee una capacidad anaerobia marcada, como demuestran las grandes concentraciones de glucógeno a nivel muscular, capacidad de síntesis y acumulación de ácido láctico y el potencial de tamponación para reducir los efectos nocivos de dicho ácido.

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

II. CARACTERÍSTICAS ATLÉTICAS DEL CABALLO.

II.1 Metabolismo energético muscular

El caballo es un animal con el doble de capacidad para el trabajo físico que el hombre, y esto le ha permitido en el pasado sobrevivir a sus depredadores.

A pesar de esto, sus mecanismos fisiológicos básicos, son esencialmente los mismos que en el hombre y en otros animales, y solamente los aspectos fisiológicos cuantitativos, hacen del caballo un ser atléticamente superior.

El mantenimiento de la contracción muscular durante el ejercicio requiere la provisión de grandes cantidades de energía química. La fuente inmediata de energía para la locomoción es el ATP. El desdoblamiento del ATP en ADP + Pi proporciona la energía necesaria para la contracción muscular. Cuando la energía se usa para el movimiento, sólo aproximadamente un 25% genera energía mecánica, el resto se pierde en forma de calor. Como resultado de esto, durante el movimiento, se produce el desdoblamiento de gran número de moléculas de ATP.

La cantidad de ATP almacenada en el músculo, es muy limitada. Se ha calculado que con estos depósitos solamente se

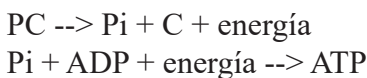
podría mantener la actividad muscular durante unos segundos.

Para que continúe la actividad muscular es necesario que las moléculas de ATP sean resintetizadas. El ritmo al cual se produce esta resíntesis, debe acoplarse al ritmo con el que se desdoblán las moléculas iniciales de ATP en el músculo, para producir energía. Por lo tanto, a medida que el animal se mueve más rápido, más intenso necesita ser el proceso de regeneración de ATP. Cuando durante ejercicios intensos el ritmo de utilización de ATP supera el ritmo de resíntesis, se produce una acumulación de ADP y AMP en el músculo, y en estos casos el organismo tiene que o bien disminuir la intensidad del ejercicio, o bien detenerlo.

Hay dos sistemas implicados en la síntesis o re síntesis de ATP: sistema anaerobio y aerobio. El sistema anaerobio puede ser alactácido, también denominado sistema ATP-Pc o sistema fosfatágeno y lactácido, consistente en la glucólisis anaerobia. El sistema aerobio consiste en la glucólisis aerobia y la oxidación de los ácidos grasos.

II.1.1. Sistema anaerobio

En el **sistema ATP-Pc** la energía necesaria para la síntesis o resíntesis de ATP, proviene del desdoblamiento del fosfato de creatina, dando lugar a una molécula de fosforo inorgánico más creatina más energía que se utilizara en la contracción muscular; posteriormente, por la unión de una molécula de fosforo inorgánico con ADP y energía, se obtiene una molécula de ATP



La isoforma mitocondrial de la enzima creatina quinasa pro-

duce fosfocreatina en la mitocondria, mientras que la isoforma miofibrilar cataliza la formación de ATP en el sarcoplasma (Votion 2014).

Estos depósitos pueden mantener un ejercicio durante unos 10 segundos sin el aprovisionamiento de ATP por otras fuentes. Se necesitan otras fuentes de energía para resintetizar ATP y fosfocreatina. Estas fuentes primarias son el glucógeno, los triglicéridos almacenados en el musculo, la glucosa (tanto la proveniente de los procesos de absorción intestinal como la del desdoblamiento del glucógeno hepático) y los ácidos grasos del torrente circulatorio, que provienen de la movilización de los triglicéridos del tejido adiposo periférico (Muñoz y col. 2002).

En el **sistema anaerobio láctico**, está implicado el desdoblamiento incompleto de un carbohidrato hasta ácido láctico, de ahí que también se denomine "sistema del ácido láctico". El ácido láctico producido difunde desde el músculo a la sangre, y vía circulación es transportado al hígado donde se convierte en glucógeno. El lactato también puede ser utilizado como sustrato energético por las fibras de contracción lenta o por el miocardio en presencia de oxígeno.

En la glucólisis anaerobia solamente se obtienen 2-3 moles de ATP de un mol de glucosa, mientras que, en la glucólisis aerobia, como más adelante veremos, se obtienen 38-39 moles de ATP.

La glucólisis anaerobia, así como el sistema fosfágeno, son extremadamente importantes en ejercicios que requieren un aporte rápido de ATP. Por ejemplo, ejercicios de realización a un ritmo máximo durante 1 a 3 minutos (Fox y Mathews, 1981).

II.1.2. Sistema aerobio

En el **sistema aerobio**, con presencia de oxígeno, 1 mol de glucosa se desdobra hasta CO_2 y H_2O , liberando suficiente energía

para resintetizar 38 moles de ATP. Las reacciones del sistema oxigenado están confinadas, dentro de la célula muscular, a la membrana de la mitocondria.

Las reacciones del sistema aerobio pueden agruparse en tres series principales: glucolisis aerobia; el ciclo de Krebs y el sistema de transporte de electrones.

Durante la glucolisis aerobia 1 mol de glucógeno se desdobra en 2 moles de ácido pirúvico, liberando suficiente energía para resintetizar 3 moles de ATP.

Durante el ciclo de Krebs, se producen dos cambios químicos importantes: producción de CO₂ y oxidación, o lo que es lo mismo, liberación de electrones. En este caso los electrones son liberados en forma de átomos de hidrogeno.

Durante el sistema de transporte de electrones, lo que ocurre en la cadena respiratoria, es que los átomos de hidrógeno y los electrones son transportados al oxígeno por “portadores de electrones” en una serie de reacciones enzimáticas cuyo producto final es el H₂O. En la medida en que se produce el transporte de electrones, se libera energía para la síntesis de ATP. Por cada par de electrones que son transportados, se libera suficiente energía para resintetizar 3 moléculas de ATP. En conjunto, se transportan 12 pares de electrones por molécula de glucógeno, generando 36 moléculas de ATP. En resumen, durante la glucolisis aerobia se generan 39 moléculas de ATP por molécula de glucógeno muscular, o 38 moléculas de ATP por molécula de la glucosa procedente del torrente circulatorio o del glucógeno hepático, ya que se pierde una molécula de ATP en la refosforilación de la glucosa sanguínea al pasar a glucosa 6 fosfato en la membrana del musculo. (Fox y Mathews, 1981).

Por otra parte, se requieren 6 moléculas de oxígeno para el desdo-

blamiento de 180 gramos de glucógeno. Como una molécula de cualquier gas ocupa 22.4 litros, 6 moléculas de oxígeno ocuparán 134.4 litros. Por lo tanto, para re sintetizar 39 moléculas de ATP se requieren 134.4 litros de oxígeno, o, dicho de otra forma, se requieren 3.45 litros de oxígeno para resintetizar una molécula de ATP. Estos requerimientos de oxígeno van a ser importantes para la elección de un sustrato energético.

Los lípidos son usados por el organismo como sustrato energético desdoblándose en una serie de reacciones que se conocen como oxidación beta. Estas reacciones preparan a los lípidos para entrar en el ciclo de Krebs. (Fox y Mathews, 1981)

Los ácidos grasos llegan al músculo desde los triglicéridos almacenados en el tejido adiposo a través del torrente circulatorio, sugiriéndose que la toma de ácidos grasos por el músculo esquelético se hace por difusión a favor de un gradiente de concentración. Como consecuencia, el aumento del ritmo de entrada de los ácidos grasos al músculo se debe a: aumento de los niveles de ácidos grasos en sangre, como ocurre en las carreras de resistencia (raids y en los concursos completos de equitación), o aumento del ritmo de oxidación en la célula muscular (McMiken 1983) También se encuentran triglicéridos almacenados en los miocitos y en las lipoproteínas de baja densidad. En los caballos, a diferencia de otras especies atléticas, hay un aumento de los triglicéridos circulantes durante los periodos de ejercicio (Poso y col 1989). La lipoproteína lipasa localizada en exterior de la membrana endotelial de los capilares musculares, puede liberar ácidos grasos de los triglicéridos circulantes para la oxidación muscular. El glicerol procedente de la hidrolisis de los triglicéridos se convierte en glicerol-3-fosfato y entra en las vías glucolíticas como sustrato neoglucogénico para la formación de nuevas moléculas de glucógeno en el hígado.

II.1.3 Almacenamiento de energía en el organismo

El caballo, como cualquier animal, necesita almacenar energía en el organismo para que le sirvan de reserva en el momento del ejercicio, ya que como se ha dicho antes la cantidad de ATP almacenada en el músculo se encuentra limitada. Los depósitos de ATP y de fosfato de creatina de donde se obtiene energía “rápidamente”, se encuentran muy limitados, mientras que existe una gran capacidad de almacenamiento de glucógeno y sobre todo de grasas en el organismo.

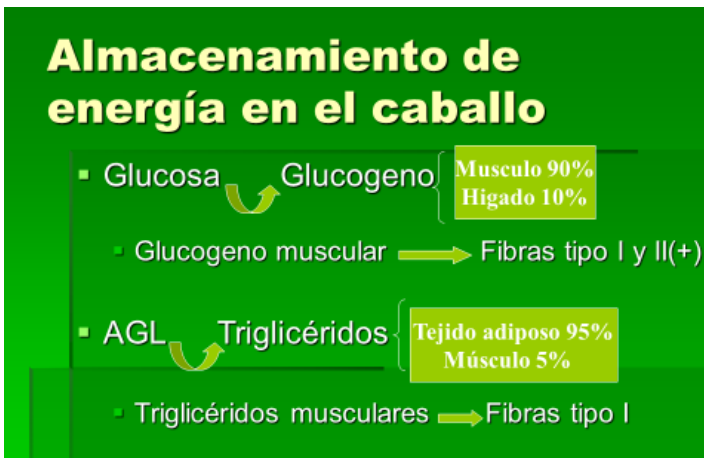


Fig. 3. Almacenamiento de energía en el caballo

El almacenamiento de glucosa se hace en forma de glucógeno cuando el organismo está en reposo. El glucógeno se almacena fundamentalmente en las células hepáticas y musculares. El glucógeno hepático se está usando continuamente para suministrar glucosa a todos los tejidos del organismo. Hay una liberación constante de glucosa a la sangre procedente del glucógeno hepático para satisfacer estos requerimientos tisulares. El organismo, posee un sofisticado sistemas de hormonas que controlan la cantidad de glucosa liberada al torrente circulatorio para que esta se mantenga a un nivel constante (glucemia).

En el caballo, la mayor parte del glucógeno almacenado se encuentra en los músculos, principalmente en las fibras de contracción rápida y sólo es utilizado cuando se necesita glucosa para la contracción muscular, el resto se almacena en el hígado y es utilizado para satisfacer las necesidades de glucosa del resto de tejidos orgánico (Fig. 3). La capacidad de un animal para llevar a cabo trabajos prolongados está relacionada con la capacidad de almacenamiento de glucógeno en el músculo. La concentración de glucógeno en el musculo varía desde 300 a 650 micro moles por gramo de peso de sustancia seca, dependiendo del musculo, estado de entrenamiento y dieta (Snow y col. 1987) Se ha comprobado experimentalmente en caballos trotones, que el ritmo máximo de utilización de glucógeno en la carrera es de aproximadamente 12 mmol/kg/min y se presume que estos valores pueden ser superiores en el caballo PSI.

El ritmo de resíntesis de glucógeno muscular es del orden de 0.2 mmol/kg/min, lo que representa menos del 2% del ritmo de depleción. Esta velocidad de resíntesis es muy reducida, de forma que la depleción de glucógeno puede ser un problema en competiciones prolongadas o cuando las competiciones se llevan a cabo en días diferentes. En seres humanos, una práctica común es la supercompensación de glucógeno, consistente en realizar ejercicios de mayor intensidad, pero de menor duración la semana previa a la competición, para reducir la concentración de glucógeno muscular, y combinarla con una dieta alta en carbohidratos, lo que permite una regeneración completa de las reservas musculares de glucógeno. Esta estrategia, sin embargo, no es útil en el caballo, debido a la baja tasa de recuperación de las reservas de glucógeno. Por un lado, una dieta elevada en carbohidratos puede ocasionar disturbios digestivos en esta especie y por otro lado, la fosforilación de la glucosa para introducirla en el interior de la fibra muscular tiene una velocidad muy reducida (Lacombe y col., 2001).

Las grasas corporales constituyen otra de las fuentes de energía para el organismo (Fig. 3) Las grasas se almacenan en forma de triglicéridos. Los triglicéridos, están formados por una molécula de glicerol a la que se unen tres moléculas de ácidos grasos. Las moléculas de triglicéridos se almacenan en todas las células del organismo, incluidas las células musculares. No obstante existen en el organismo células especializadas en el almacenamiento de triglicéridos, como son los adipocitos del tejido adiposo. Cuando se necesita energía en el organismo, la molécula de triglicéridos se rompe, quedando libres los ácidos grasos en el torrente circulatorio en forma de ácidos grasos libres. Otra de las fuentes de ácidos grasos son los ácidos grasos volátiles procedentes de las dietas ricas en carbohidratos que no son degradados por la amilasa pancreática y que sufren la fermentación bacteriana en el ciego y el colon del caballo, como son principalmente el acetato, propionato y butirato. En reposo, el acetato provee aproximadamente el 30% de la energía del músculo (Pethick y col. 1993), mientras que el propionato se usa fundamentalmente para la gluconeogénesis (Ford y col. 1985; Simmons y col. 1991).

II.1.4. Adaptación de la fuente de energía al tipo de trabajo que se realiza.

Cuando un caballo trabaja, puede usar más de una fuente de energía al mismo tiempo. La cantidad relativa de las diferentes fuentes de energía para resíntesis de ATP, depende de factores, como la intensidad del ejercicio, su duración y el estado de forma del caballo, y esto último depende de su nutrición y de su entrenamiento (Votion y col. 2007). De igual forma el uso preferente de un substrato energético también depende de su disponibilidad, actividad de las enzimas oxidativas, disponibilidades de oxígeno, densidad mitocondrial y vascularización. La enzima fosfofructoquinasa, es considerada como un indicador del metabolismo anaerobio porque su actividad

es regulada por el cociente ATP/ADP, y cuando este cociente disminuye, la actividad de la fosfofructoquinasa aumenta, y como resultado aumenta la producción de piruvato. En condiciones anaerobias el piruvato por acción de la LDH es convertido en ácido láctico. Posteriormente, el ácido láctico se desdobra en condiciones fisiológicas en protones y lactato.

Bajo condiciones de reposo alrededor de 2/3 del sustrato energético es contribuido por las grasas y el otro tercio restante, por los carbohidratos. En estas condiciones, el único sistema energético que opera, es el sistema aerobio, ya que el sistema de transporte del oxígeno es capaz de suministrar a cada célula suficiente oxígeno para suplir los requerimientos de ATP en un estado de reposo.

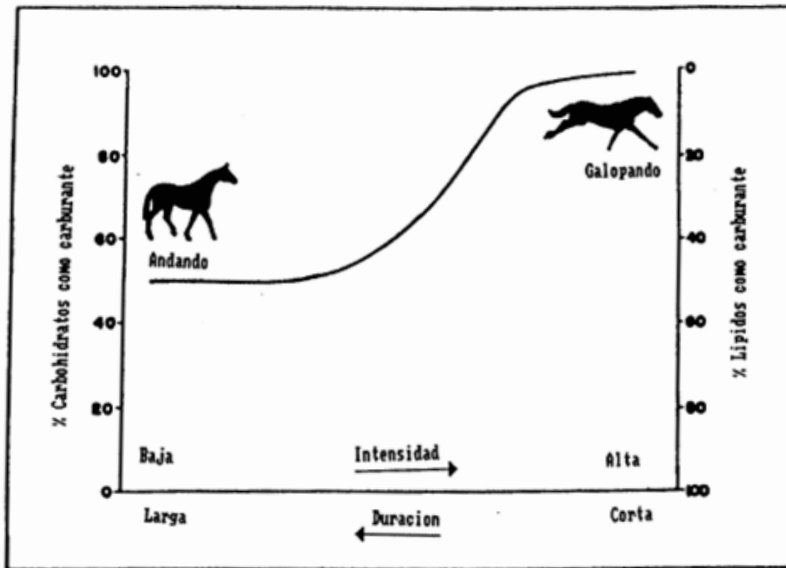


Fig. 4.- Relación entre utilización de sustrato energético (carbohidratos o lípidos) y la intensidad y duración del ejercicio.

En ejercicios de corta duración y alta intensidad, el sustrato energético utilizado son los carbohidratos y el sistema metabólico el anaerobio, mientras que para ejercicios prolongados de baja intensidad, los sustratos energéticos empleados son los carbohidratos y los lípidos y el sistema metabólico el aerobio. En ejercicio de intensidad moderada y duración moderada, existe un uso variable de ambas fuentes energéticas dependiendo de las características del ejercicio y del estado deportivo del caballo. Las proteínas, si bien tienen un papel fundamentalmente estructural, también pueden ser metabolizadas en determinados momentos. En un ejercicio prolongado de más de dos horas, como son las competiciones de raid en el caballo, el principal sustrato energético al comienzo del ejercicio es el glucógeno mientras que durante el ejercicio y al final son los lípidos. El cambio de sustrato energético se hace de forma gradual, dependiendo de las disponibilidades de oxígeno por el músculo activo, lo que permite que los depósitos de glucógeno no se vacíen.

A medida que el ejercicio se hace más intenso, aumenta el porcentaje de glucógeno utilizado y disminuye el de ácidos grasos, hasta que llega un nivel de intensidad de trabajo en que solo se utiliza glucógeno. Este cambio de sustrato energético de los ácidos grasos al glucógeno, se hace gradualmente, y se produce porque las células musculares de contracción rápida y de metabolismo anaerobio, no pueden obtener energía de los ácidos grasos, y porque el glucógeno es de uso más eficiente con unas disponibilidades dadas de oxígeno. Por lo tanto, en velocidades lentas como el paso y el trote, con mayor duración del ejercicio, mayor proporción de ácidos grasos utilizados y en velocidades altas con mayor intervención del galope mayor proporción de glucógeno utilizado (fig.3). La proporción de ácidos grasos utilizados a una velocidad dada, es mayor en caballos con mejor estado de forma. Uno de los efectos del entrenamiento, es aumentar la actividad de enzimas responsables del desdoblamiento de los ácidos grasos. La ventaja de esto es que permite ahorrar glucógeno durante el ejercicio,

lo que es muy importante cuando se consideran las causas de la fatiga.

En los ejercicios de más de dos horas, la mayor fuente de ATP proviene del metabolismo aerobio. Los sistemas anaerobio y fosfágeno también contribuyen, pero solamente al principio del ejercicio, antes de que el consumo de oxígeno alcance un nivel de estado estacionario. Una vez que el consumo de oxígeno alcanza el nivel de estado estacionario, el metabolismo aerobio es suficiente para suministrar todo el ATP requerido para el ejercicio. Por esta razón el ácido láctico no se acumula en niveles altos.

Cuando se alcanza el estado estacionario de consumo de oxígeno, la glucólisis anaerobia se detiene, pero las pequeñas cantidades de ácido láctico acumuladas anteriormente se mantienen relativamente constantes hasta el final del ejercicio. Para evitar las pequeñas cantidades de ácido láctico del comienzo del ejercicio, es conveniente un buen calentamiento a velocidades bajas hasta que se establezca definitivamente el metabolismo aerobio y el músculo tenga suficiente aporte de oxígeno para realizar el ejercicio.

La fatiga experimentada por el ejercicio prolongado se debe a factores como: fatiga muscular local por depleción de los depósitos de glucógeno muscular, deshidratación por pérdida de agua y electrolitos, aburrimiento en el mantenimiento de la actividad física, y por niveles bajos de glucosa por depleción del glucógeno hepático en casos extremos.

II.1.5 Interacción de los sistemas aerobios y anaerobios durante el ejercicio. (Eaton MD 1994)

Existen actividades físicas que no pueden encuadrarse claramente en un metabolismo aerobio o anaerobio, si no que requieren una mezcla de los dos, dependiendo del tiempo y velocidad de carre-

ra. Tomemos por ejemplo la carrera de los 2.500-3.000 metros en el caballo que tienen un tiempo de duración entre dos minutos y medio a tres minutos. En estos tipos de carrera, el metabolismo anaerobio suministra la mayor proporción de ATP durante el principio como en el sprint al final de la carrera, mientras que el sistema aerobio predomina durante el “periodo estacionario” de la misma.

En el caballo los procesos glucolíticos no alcanzan el máximo hasta los 30 segundos, mientras que el metabolismo aerobio es un proceso más lento y no entra en un máximo de producción hasta los 60 segundos.

El balance entre las vías aerobias y anaerobias, está de acuerdo con el tiempo y la potencia de ejecución de la prueba, con las disponibilidades de oxígeno por la célula, y con las disponibilidades de enzimas mitocondriales.

En reposo, y en ejercicio de baja intensidad como el paso y el trote, está implicada principalmente la vía aerobia. Durante este tipo de ejercicio la concentración celular de ATP estará alta y la de ADP baja. Durante el galope, al incrementarse la velocidad, se empieza a perder ATP y acumular ADP en la célula, con lo que se estimula progresivamente la participación cada vez mayor de las vías anaerobias sobre las aerobias. Como resultado, a medida que el caballo corre más rápido aumenta el porcentaje de energía que proviene del metabolismo anaerobio y por lo tanto la producción de lactato. El lactato producido en el músculo pasa a la sangre, y si el hígado no tiene capacidad suficiente para metabolizar el lactato producido, se aumentan los niveles de lactato en sangre cuando el caballo corre más rápido, hecho que se conoce como umbral anaerobio.

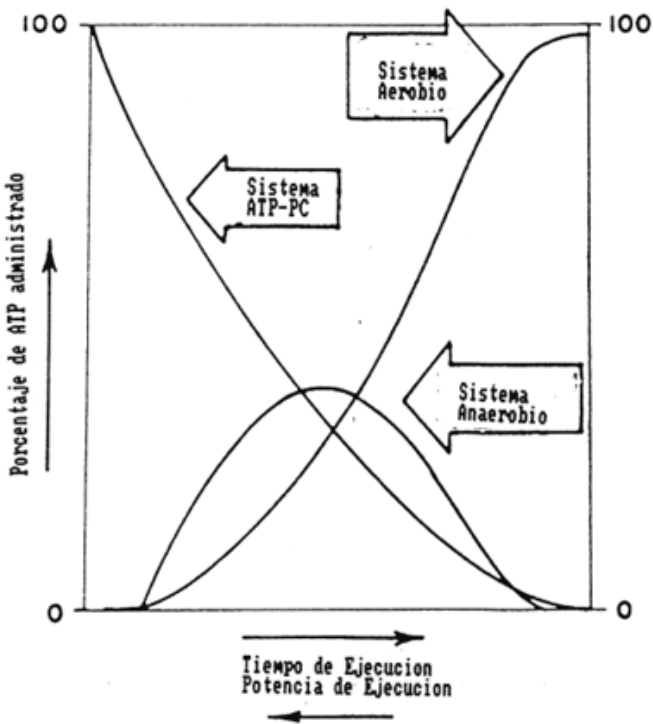


Fig. 5 Relación entre el porcentaje de ATP suministrado por los tres sistemas energéticos en relación al tiempo y potencia de ejecución de la prueba.

II.1.6 Índices de rendimiento metabólico

La medida de la concentración de lactato en sangre, se usa comúnmente como indicador de la capacidad aerobia y anaerobia, tanto en el hombre como el caballo. Durante ejercicios de intensidad progresiva la concentración de lactato aumenta de forma bimodal: a bajas velocidades, tiene un componente lineal, pero una vez que aumenta la intensidad de ejercicio, la acumulación de lactato sigue un modelo exponencial (Persson y col. 1974; Kinderman y col. 1979; Wilson y col. 1983). El punto de inflexión de esa curva exponencial significa que la producción de CO_2 y el consumo de oxígeno

se iguala, coincide con una concentración de lactato de 2mmol/l y se denomina umbral aerobio o VLa2. Se usa como indicador de rendimiento aerobio tanto en el hombre como en el caballo. En general a medida que el caballo tiene mejor rendimiento aerobio, más tarda en llegar a ese umbral, por lo tanto, un umbral aerobio alto es sinónimo de una buena condición física en los ejercicios de resistencia. Si la intensidad del ejercicio sigue aumentando la producción de lactato se va incrementando cada vez más hasta que llega un punto en que se superan los 4 mmol/l. En ese punto se dice que el metabolismo anaerobio se instala definitivamente en los mecanismos de producción de ATP muscular, y se le denomina umbral anaerobio o VLa4 (Castejón y col. 1994; Muñoz A. y col. 1999). Por lo tanto, el cambio de un metabolismo aerobio a un metabolismo anaerobio no se hace de forma súbita si no de forma progresiva. A esa zona se le denomina zona de transición aerobia-anaerobia (Kinderman y col. 1979; Sjodin, y col. 1981)

También puede considerarse a la concentración máxima de lactato después de un ejercicio intenso (el “pico de lactato”), como un indicador de rendimiento anaerobio (Gauvreau y col. 1996), ya que caballos con buen rendimiento deportivo en carreras de velocidad sobre distancias cortas, tienen mayor capacidad de pasar el piruvato a lactato en las rutas glucolíticas, causando un pico de lactato más alto. Igualmente, el pico de lactato tras un cros-country puede ser superior en caballos de concurso completo de más éxito. Hay que tener en cuenta que el pico de lactato en estos casos, no se produce inmediatamente tras el ejercicio, sino entre los 5-15 min post ejercicio.

El significado del lactato en sangre es complejo debido a que los glóbulos rojo en el caballo a diferencia de otras especies atléticas pueden secuestrar lactato en su interior hasta en un 50% del total de lactato en sangre, mientras que en los atletas humanos los glóbulos

rojos solo secuestran un 20% (Juel y col. 1990). La toma de lactato por los glóbulos rojos posee variaciones interindividuales debido a la diferente actividad de los transportadores de monocarboxilato (MTC) que facilita el paso de lactato a través de la membrana de los glóbulos rojos (Koho y col. 2006). Los caballos con esta alta actividad de transporte, tienen mayor concentración de lactato en sangre y esto está relacionado con un mayor rendimiento anaerobio. (Rasanen y col 2002). El pico de lactato en sangre esta entre 18,8 y 18,7mmol/l, mientras que el pico de lactato en plasma es de 21,4 a 29,6 mmol/l,. Esta alta capacidad parece estar dominada por un alelo, por lo que puede considerarse hereditaria Desde un punto de vista práctico la determinación de lactato se hace en sangre total.

Además, el caballo, debido a su gran masa muscular, tiene el doble de capacidad “buffer” que el hombre, por lo que el pico de lactato es el doble y esto le permite mantener una velocidad más alta durante más tiempo. Tras la disociación del ácido láctico, los protones producidos tienen un efecto negativo sobre la resíntesis energética muscular. El descenso de pH limita la actividad de numerosas enzimas implicadas en la glucólisis, como es el caso de la fosfofructoquinasa, mencionada previamente como enzima reguladora del flujo energético glucolítico. Sin duda, este mecanismo es una adaptación fisiológica muy interesante para la velocidad en el caballo.

La acumulación de ácido úrico en el musculo y plasma, también es un indicador de actividad metabólica. Durante el ejercicio intenso el ritmo de utilización de ATP muscular es más alto que el ritmo de resíntesis de ATP con lo que se van acumulando más moléculas de ADP y AMP. La resíntesis de ATP mediante dos moléculas de ADP produce una molécula de AMP. Cuando hay acumulo de AMP en el musculo al aumentar la intensidad del ejercicio, las moléculas de AMP son desaminadas a IMP por la enzima AMP desaminasa (Lowenstein, 1990; Schuback y col. 1999; Evans y col. 2002)

y de IMP pasan a ácido úrico. La reacción de la AMP desaminasa esta acoplada a las vías anaerobias y a la glucolisis. Un ritmo alto de la glucolisis provoca formación de lactato y por lo tanto aumenta la concentración de los iones de hidrogeno, lo que incrementa la actividad de la AMP desaminasa. Esta mayor producción de los nucleótidos de adenina es la causa de los aumentos de ácido úrico y por lo tanto de su acumulación en el musculo y el plasma sanguíneo cuando se aumenta la actividad glucolítica (Essen-Gustavsson y col. 1999). No obstante, también se han encontrado aumentos de la concentración de ácido úrico después de las competiciones de raid, debido probablemente a unas demandas metabólicas altas por la gran cantidad de trabajo realizado, Las concentraciones de ácido úrico fueron mayores después de una carrera de 120 km donde se alcanzaron mayores velocidades que en otra carrera de 160 km donde las velocidades fueron más bajas aunque el terreno era más ondulado (Castejón y col. 2006). El ácido úrico producido permanece en el musculo durante 20-30 minutos después de un ejercicio, por lo que su medida en sangre, es un buen indicador de la intensidad metabólica alcanzada. Por otro lado, la presencia de ácido úrico después del ejercicio, es un factor limitante del rendimiento, ya que indica la activación de la vía descrita anteriormente, denominada vía de los nucleótidos de purina. Esta vía conduce a una pérdida no recuperable del nucleótido adenina, esencial para la resíntesis de ATP, ya que la reacción catalizada por la enzima IMP desaminasa es irreversible (Castejón y col. 2006; Trigo y col. 2010).

Por ultimo en los ejercicios que requieran una gran velocidad, como son las carreras entre los 400 y los 800 metros que realizan los caballos “Cuartos de Milla”, el sistema de energía que predomina es el sistema ATP-PC o sistema fosfágeno y en menor proporción el metabolismo anaerobio.

La primera fuente de energía es la fosfocreatina, que posee un

enlace fosfato rico en energía, similar al de ATP. La hidrólisis de fosfocreatina trasfiere el grupo fosfato a el ADP para formación de ATP. La isoforma mitocondrial de la enzima creatina quinasa produce fosfocreatina, mientras que la isoforma miofibrilar cataliza la resíntesis de ATP en el sarcoplasma. La cantidad de fosfocreatina almacenada solo dura unos segundos, por lo que para continuar el ejercicio se utiliza el glucógeno muscular contenido en las fibras de contracción rápida tipo IIX. El contenido de glucógeno muscular oscila entre los 300-600 micro moles de materia seca dependiendo del estado de entrenamiento y la dieta (Guy y Snow, 1977; Snow y col 1987; De Meeus d'Argenteuil et al., 2021), con lo que se puede mantener la actividad durante un minuto o minuto y medio.

Como se ha mostrado a lo largo de este apartado, la resíntesis de energía por vías aerobias durante el ejercicio es un aspecto esencial del caballo atleta. Con excepción de las carreras de corta duración (400 m) de Cuartos de Milla, donde predomina la resíntesis anaerobia (60%) frente a la aerobia (40%), en el resto de competiciones, el metabolismo aerobio, es predominante, oscilando entre un 70% en carreras de 1000 m a un 95-98% en competiciones de 80-160 km.

Por ello, la cadena de transporte de oxígeno es determinante en el caballo atleta, estando integrada por factores respiratorios, cardiovascular, hematológicos y musculares.

II.2.Sistema respiratorio

La capacidad de producir energía por el metabolismo aerobio, depende de la cantidad de oxígeno que puede ser usado por la mitocondria, que es la cámara de combustión de las células, y esto depende de que se haya liberado suficiente oxígeno a las células musculares.

Como el oxígeno proviene del aire que el caballo respira, los factores que pueden influenciar este aporte se pueden resumir en:

- 1.- Ventilación pulmonar.
- 2.- Difusión, paso del oxígeno de los pulmones a la sangre.
- 3.- Capacidad de transporte de oxígeno por la sangre.
- 4.- Paso de oxígeno de la sangre al músculo.
- 5.- Utilización del oxígeno por las mitocondrias.

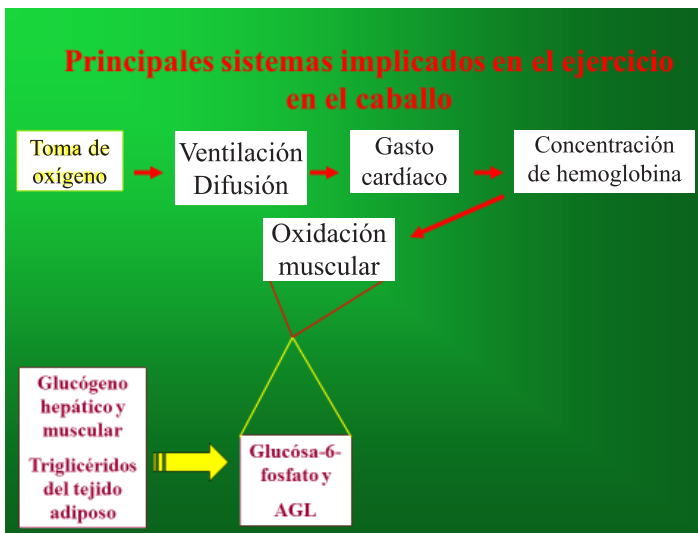


Fig 6 Sistemas implicados en la cadena respiratoria de oxígeno durante el ejercicio en el caballo

II.2.1. Ventilación pulmonar.

El **sistema respiratorio** del caballo se caracteriza por poseer unos volúmenes respiratorios muy elevados, con una gran superficie de intercambio gaseoso. El caballo en reposo mueve 60 litros de aire por minuto, que puede aumentar con el ejercicio intenso hasta 1400-1800 L/min, y con el ejercicio máximo hasta 2000L/min.

La frecuencia respiratoria aumenta desde 12 r.p.m en reposo hasta 120 en ejercicio. En el caballo la frecuencia respiratoria durante el galope está ligada al tranco del caballo para mejorar su eficacia, de tal forma que el caballo inspira durante la fase de suspensión y expira durante la fase de apoyo. Esto hace que durante el galope los aumentos del volumen minuto se hacen preferentemente a expensas de aumentos del volumen corriente o volumen tidal. (Castejón, y col, 2007)

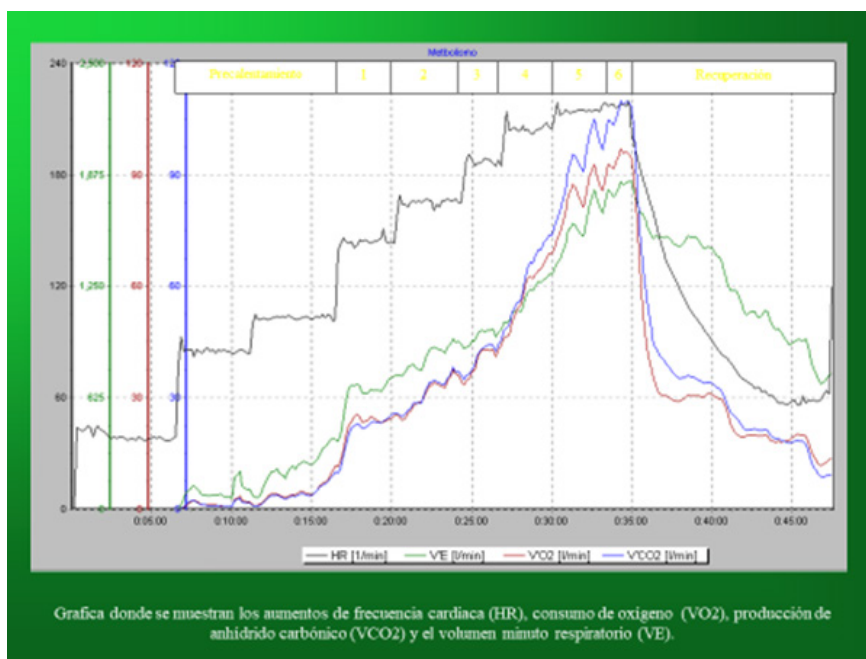


Fig.7. *Parametros registrados con mascara respiratoria en el caballo, durante una prueba de intensidad creciente.*

El poder oxidativo de un caballo puede predecirse por la medida del consumo de oxígeno (VO_2) y la producción de CO_2 (VCO_2) mediante una máscara respiratoria (Castejón F. y col 2007) Se ha observado una fuerte correlación positiva entre $VO_{2\max}$ y el rendimiento

físico en caballos de carreras Pura Sangre Inglés y en trotones Standardbred (Kearns y col. 2002; Young y col. 2002).

A partir del conocimiento de la relación existente entre la capacidad de consumo de O_2 (VO_2) y un mayor potencial para los ejercicios de resistencia aeróbica, han sido muchos los métodos que han pretendido medir el VO_2 , así como la producción de CO_2 (VCO_2). El consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\max}$) como fundamento fisiológico de la capacidad de rendimiento en resistencia, se puede considerar que es el valor más representativo de esta cualidad física. Su evaluación se realiza objetivamente en ml/minuto en función de las características del esfuerzo, o en función del peso corporal, en ml/kg.p.v. ($VO_2/k.p.v.$). Un valor alto representa una condición favorable para las competiciones con predominancia aerobia.

La medición en tiempo real (“respiración a respiración”) de las concentraciones de O_2 mediante “célula de zirconio” y del CO_2 por medio del “doble haz de infrarrojos”, y la posibilidad de procesamiento inmediato de los mismos gracias a la existencia de “software” específicos, han permitido tener una información de los acontecimientos fisiológicos que tiene lugar en el intercambio de gases en el mismo momento que están ocurriendo. En el caballo, esta tecnología la poseen contados centros en el mundo, y en España es utilizada por en el Centro de Medicina Deportiva Equina (CEMEDe) de la Universidad de Córdoba. Mediante esta técnica se obtiene el O_2 consumido y el CO_2 producido en cada momento del esfuerzo, lo cual ha supuesto un avance fundamental dentro de la fisiología del esfuerzo, puesto que permite conocer la respuesta fisiológica al ejercicio y la adaptación cardiorrespiratoria en relación a los distintos incrementos de carga que el esfuerzo tiene y observar y evaluar cuál es la velocidad de adaptación al mismo, la recuperación, etc. La medición de los parámetros gaseosos descritos junto con los parámetros ventilatorios, también en tiempo real, ha propiciado que dentro de la

Ergometría en general, adquiere personalidad propia la Espirometría de esfuerzo llamada Ergoespirometría.

La determinación de parámetros ventilatorios durante el esfuerzo ha constituido una línea de trabajo importante dentro de la Ergometría durante años. Sin embargo, el estudio del aparato respiratorio del caballo en ejercicio se ha visto limitado por el costo de los elementos necesarios, y porque el uso de los mismos altera en mayor o menor medida la respuesta normal. En la actualidad la posibilidad de determinar estos parámetros mediante las técnicas digitales “respiración a respiración” permiten medir en tiempo real una gran cantidad de datos entre los que cabe destacar la ventilación pulmonar (VE), frecuencia respiratoria (FR) y volumen respiratorio o tidal (Vt) (Castejon y col 2007; Castejon-Riber y col. 2011) (Muñoz y col. 2013).

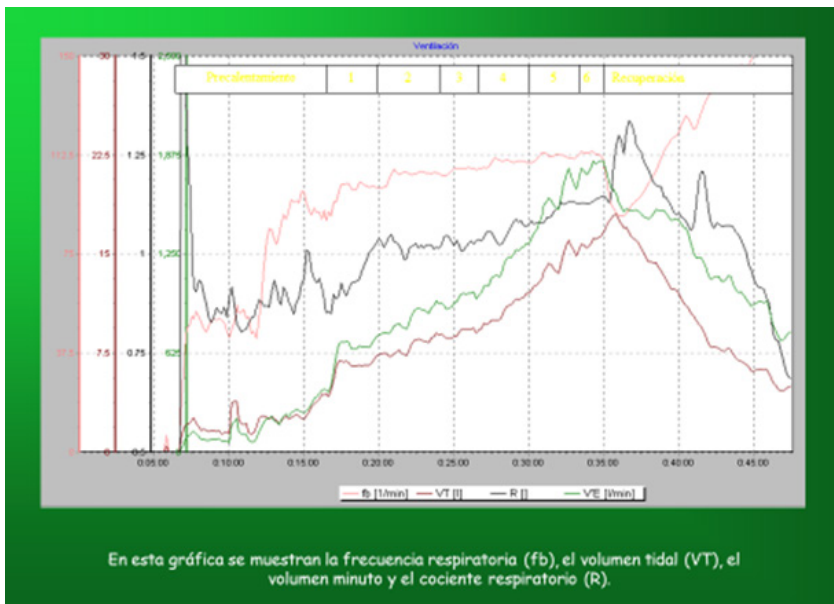


Fig. 8. Parámetros respiratorios registrados con una mascarilla respiratoria durante una prueba de intensidad creciente en el caballo

Al realizar un test de ejercicio podemos observar como el volumen minuto, aumenta a expensas del volumen tidal y la frecuencia respiratoria. Al principio del ejercicio, en los aires mas lentos como el paso y trote la participación de ambos es similar, pero en el momento que se inicia el galope hay una mayor participación del volumen tidal por el hecho que supone la sincronización de la frecuencia respiratoria con la frecuencia de tranco del caballo (Castejon-Riber y col, 2011). (Fig. 8)

Como ya veremos mas adelante, en algunas competiciones, el aumento de velocidad se produce a expensas de un alargamiento del tranco, lo que permite un mayor tiempo inspiratorio. Solo es al final de la carrera, cuando para aumentar la velocidad, aumenta la frecuencia de tranco, instaurando preferentemente el metabolismo anaerobio, con lo que le respiración deja de ejercer su papel preponderante.

La relación entre la velocidad, frecuencia y longitud de tranco se ha estudiado mucho en los últimos años en caballos Pura Sangre Inglés, en función de la distancia en la que compiten. En algunos casos, los caballos PSI incrementan primero la velocidad mediante un aumento de la frecuencia de tranco, hasta alcanzar una velocidad de unos 45 km/h y posteriormente, aumentan la velocidad máxima, mediante un alargamiento del tranco (hasta los 65 km/h) (Schurs et al., 2022). Sin embargo, en otros estudios, se ha demostrado que, una vez que el caballo ha alcanzado su máxima longitud de tranco intrínseca, dependiente de la longitud del miembro y de los ángulos máximos entre los miembros y tronco, determinantes de la capacidad de protracción, el incremento de la frecuencia de tranco es el único mecanismo por el cual se puede producir el aumento de velocidad (Morrice-West y col., 2020). Posiblemente estas diferencias estén parcialmente asociadas a la distancia recorrida por los caballos. Los PSI que compiten en distancias cortas (‘sprinters’), muestran una musculatura muy desarrollada, tienen una al-

zada a la cruz inferior y requieren una fuerza explosiva rápida, así como un VO_2 máx muy elevado, por lo que la frecuencia de tranco debe ser superior, para garantizar un mayor aporte de oxígeno por el acoplamiento locomoción-respiración al galope. Por el contrario, los caballos de carreras que compiten en distancias superiores (más de 2500 m), necesitan más resistencia, a menudo asociada a una menor muscularización y con unas longitudes de tranco más largas. Estas características son muy importantes a la hora de determinar a que tipo de carrera se ajusta mejor un individuo y por otro lado, se ha visto una relación con el polimorfismo de un único nucleótido en el gen de la miostatina, que controla el desarrollo muscular. (McGivney y col.,2010).

La medida del consumo de O_2 (VO_2), y producción de CO_2 (VCO_2), establece la relación existente entre ambos (VCO_2/VO_2) denominada “cociente respiratorio” (RQ o RER). Con el análisis de la última fracción del aire espirado se determinan las presiones parciales de O_2 (PETO_2) y CO_2 (PETCO_2), las cuales son indicativas de la concentración de estos gases a nivel alveolar.

Estableciendo la relación entre parámetros ventilatorios y gaseosos se obtienen datos como los equivalentes respiratorios de O_2 y CO_2 (VE/VO_2 y VE/VCO_2), que informan sobre la utilización metabólica del aire. Actualmente se sabe que la acidosis metabólica que tiene lugar durante ejercicios intensos es en realidad consecuencia del intercambio de gases a nivel celular y por lo tanto puede ser evaluada mediante el análisis del intercambio de gases a nivel pulmonar. En principio, para la determinación del umbral anaerobio se utiliza la pérdida de la linealidad en la ventilación pulmonar (VE), coincidente con un incremento de la producción de CO_2 (VCO_2) junto al consumo de O_2 (VO_2), siendo actualmente la técnica que plantea mejores perspectivas. También puede basarse en la evolución de los equivalentes de O_2 y CO_2 , observándose en la zona del umbral anaerobio un incremento del equivalente de O_2 (VE/VO_2) sin un aumento

del equivalente de CO_2 (VE/VCO_2). El umbral aerobio puede deducirse de las medidas de anhídrido carbónico y de oxígeno cuando los valores de CO_2 superan a los valores de O_2 en un momento dado. También pueden deducirse de los valores del cociente respiratorio cuando este es igual a 1. (Muñoz y col, 2013)

En cada marcha ó aire (paso, trote, galope), existe una velocidad optima de consumo de oxígeno. Estudios realizados en cinta rodante han comprobado que en cada marcha, el consumo de oxígeno es mayor a baja velocidad, y va disminuyendo cuando la velocidad va aumentando hasta un punto en que vuelve a aumentar de nuevo. La velocidad a la que el consumo de oxígeno en cada marcha es mínimo, es la velocidad natural de ese caballo, y cambia de un animal a otro. Las curvas de consumo de oxígeno en cada aire se cruzan, y es en ese punto donde los caballos cambian de marcha de forma natural. Estos cambios de marcha durante el ejercicio, previenen que el consumo de oxígeno se incremente en exceso.

Como hemos señalado anteriormente, durante el galope se produce una sincronización del tranco del caballo con su respiración, para que esta se vuelva mas eficaz. Esto se explica mediante la teoría mecánica pistón-péndulo (Attemburrow y col.,1994).

Esta teoría propone que los músculos respiratorios están ayudados por el mecanismo del tranco, de tal forma que el diafragma y la caja torácica están sometidos al efecto pistón-péndulo cuando el caballo galopa.

El efecto pistón se produce cuando las extremidades anteriores toman contacto con el suelo produciendo un efecto desacelerativo, y como consecuencia el contenido intestinal se mueve hacia delante comprimiendo el diafragma y ayudando a la espiración. El efecto péndulo se produce cuando las extremidades dejan el contacto con el

suelo y se suspenden. En ese momento la escápula se desplaza hacia delante por la contracción del músculo serrato ventral, que también mueve hacia delante a las costillas, produciendo el movimiento del paquete intestinal hacia atrás, expandiendo la caja torácica y favoreciendo la inspiración.

II.3. Sistema cardiovascular

Como ya se ha señalado anteriormente, la capacidad energética del músculo depende del aporte adecuado de oxígeno a los músculos, y esto depende de la cantidad de sangre que llega a los mismos o lo que es lo mismo del gasto cardíaco.

El consumo de oxígeno puede ser calculado multiplicando el gasto cardíaco por la diferencia arterio-venosa de oxígeno. El gasto cardíaco es el producto del volumen de contracción y la frecuencia cardíaca. El gasto cardíaco aumenta con el ejercicio tanto por aumento de la frecuencia cardíaca como del volumen de contracción. En el caballo estos dos aumentos se producen con mayor magnitud que en el hombre. El volumen de contracción de reposo en el caballo y el hombre son prácticamente similares (1.3 y 1.1 ml/kg respectivamente), mientras el aumento que se produce después de un ejercicio máximo es dos veces mayor en el caballo que en el hombre (2.7 y 1.5 ml/kg respectivamente). El volumen de contracción está directamente relacionado con el tamaño y el peso del corazón, ya que a mayor tamaño del corazón mayor capacidad de los ventrículos de almacenar sangre y por lo tanto de expulsarla al torrente circulatorio tras la contracción ventricular correspondiente. Por lo tanto el tamaño del corazón es determinante en el rendimiento energético durante el ejercicio. El corazón más pesado conocido en 8,2kg, corresponde al caballo Sham, no obstante, estimaciones realizadas con el mítico caballo Secretariat, dan valores de 10 kg, lo que supondría un gasto cardíaco de 500l/ min. y una VO_2 max de 220l/min. Secretariat, posee todos los grandes récords de carreras en el mundo y tiene la cuali-

dad de no haber sido batido por ningún caballo en todas las carreras en que participo. Estudios comparativos realizados en el caballo atleta y en el atleta humano han establecido para el tamaño cardíaco valores de 20 y 4 gr/kg de peso corporal para ambas especies respectivamente.

Dada la importancia del tamaño cardíaco en el rendimiento deportivo, se han hecho diversos estudios para estimarlo. Inicialmente, estos estudios se basaron en la duración media del complejo QRS del electrocardiograma en las derivaciones I, II y III de los miembros, estableciendo lo que se conoce como índice cardíaco (heart score) (Steel, 1977). De igual forma se estableció una relación positiva entre el índice cardíaco y el dinero ganado en competiciones. Posteriormente, se han llevado a cabo varios estudios con la finalidad de relacionar los valores de VO_2 max y el tamaño cardíaco, determinado mediante ecocardiografía (Young y col. 2002). VO_2 max estuvo correlacionado con el tamaño del ventrículo izquierdo, tras indexar en función del tamaño del caballo.

También existen diferencias en el tamaño del corazón en diversas razas de aptitud deportiva distinta. Aquellas que tienen una mayor aptitud deportiva poseen un mayor tamaño cardíaco en relación a su peso corporal, lo que supone un mayor aporte sanguíneo al torrente circulatorio y como consecuencia una mayor capacidad aerobia. En los caballos, el tamaño del corazón está entre 1.1 y 0.9 % del peso corporal, lo cual es superior a otras especies no atléticas.

La frecuencia cardíaca en el caballo en reposo es de 20-40 lat/min, la mitad que en el hombre (40-60 lat/min), y aumenta durante un ejercicio máximo hasta 240-250 lat/min. El gasto cardíaco de caballos PSI durante ejercicio intenso puede llegar a alcanzar valores de 400L/min. Existe una relación lineal entre frecuencia cardíaca y VO_2 , lo que demuestra que a mayor aporte sanguíneo al torrente circulatorio, se produce un mayor aporte de oxígeno al músculo.

Durante el ejercicio se produce una redistribución del flujo sanguíneo para que reciban mayor cantidad de sangre aquellos órganos que más lo necesitan como es el caso del músculo. El músculo por tanto pasa de recibir en reposo un 15 % a pasar al 80 % durante el ejercicio.

La frecuencia cardíaca está regulada por el sistema nervioso autónomo de tal forma que en reposo el sistema parasimpático actúa de freno en el corazón, estableciendo los valores de reposo de la frecuencia cardíaca, que en el caballo oscilan entre 20 y 40 lat/min, como ya se indicó anteriormente. Al iniciarse el ejercicio se aumenta la frecuencia cardíaca a medida que disminuye la actividad parasimpática hasta llegar a las 110-120 lat/min. En ese momento comienza la estimulación simpática aumentando la frecuencia cardíaca progresivamente, llegando hasta valores máximos de 240-250 lat/min. El aumento tan considerable de los valores de frecuencia cardíaca entre el reposo con el ejercicio permite una gran capacidad para aumentar el gasto cardíaco y por lo tanto el consumo de oxígeno máximo. También se ha observado que existe una disminución de la frecuencia cardíaca de reposo con la edad y con el aumento del volumen de contracción producido como consecuencia del entrenamiento.

La frecuencia cardíaca es usada para estimar un buen estado de forma, reduciéndose en respuesta a una intensidad de ejercicio determinada tras un entrenamiento. Sin embargo, la frecuencia cardíaca máxima no es un indicador de rendimiento, ni se modifica con el entrenamiento. Sí se modifica la velocidad a la cual se alcanza esta frecuencia cardíaca (VFCmax), siendo un marcador de funcionalidad positivo en caballos PSI de carreras.

Durante un test de ejercicio creciente, la frecuencia cardíaca aumenta de forma lineal con la velocidad del ejercicio. Por extrapolación de esta relación se pueden obtener dos índices de rendimiento,

V150 y V200. V150 coincide con VLa_2 , por lo que se puede considerar como un buen índice de rendimiento aerobio. V200 coincide con los valores de VLa_4 , por lo que también se puede considerar como un buen índice de rendimiento anaerobio. Por otro lado, en un test de ejercicio, se pueden obtener otros dos índices funcionales de la extrapolación entre frecuencia cardíaca y lactato, como son $HRLa_2$ y $HRLa_4$. (Castejón y col, 1994; Agüera y col, 1995; Muñoz y col 1999, a,b). Estos índices también son útiles para investigar el efecto del entrenamiento, de tal forma que se observa un aumento a medida que el entrenamiento progresa (Agüera y col, 1995; Kindermann y col, 1979; Foreman y col, 1990; Sloet y col, 1987).

II.4. Hematología y bioquímica sanguínea

La sangre consiste en un conjunto de diversos compuestos que juegan un papel esencial en soportar el aumento de la tasa metabólica en el ejercicio por el transporte de oxígeno, agua, electrolitos, y hormonas al músculo durante el ejercicio. Además el CO_2 y otros productos de deshecho producidos durante el ejercicio son retirados del músculo por la circulación.

La evaluación del hemograma y la bioquímica plasmática o sérica han sido usados para comprobar el estado funcional o de salud de un amplio rango de sistemas corporales en el caballo atleta. Estos test, en reposo o tras el ejercicio, se usan para comprobar el estado de forma, el estado de salud, el potencial de rendimiento, así como estados de falta de rendimiento en el caballo. (Agüera y col 1995; Rubio y col 1995; Trigo y col 2010; Muñoz y col 2008,2010,2011,2015)

Los glóbulos rojos o eritrocitos son células muy especializadas que poseen una solución de electrolitos y proteínas en su interior de las cuales el 95% es la hemoglobina.

La hemoglobina es una hemoproteína que está constituida por una parte proteica, la globina, y un núcleo prostético coloreado, el grupo hemo; El grupo hemo posee cuatro átomos de hierro los cuales son capaces de unirse con cuatro átomos de oxígeno.

II.4.1 Funciones de los Eritrocitos

Las funciones de los eritrocitos son: Transporte de oxígeno, desde los alvéolos pulmonares a la sangre capilar y de estos a los tejidos, mediante la hemoglobina. Transporte de anhídrido carbónico, desde los tejidos a los alvéolos pulmonares. y participación en la regulación del pH de la sangre.

II.4.1.1 Transporte de oxígeno.

El oxígeno es transportado en la sangre en dos formas,; la mayor parte en combinación con la hemoglobina y una pequeña parte, como oxígeno disuelto. Bajo condiciones normales 0,3 ml de oxígeno disuelto se transportan en 100 ml de sangre.

La cantidad de oxígeno transportado por la hemoglobina es mucho mayor que el transportado en forma disuelta. En condiciones normales la presencia de la hemoglobina contenida en los eritrocitos, aumenta la capacidad de transporte de oxígeno por la sangre aproximadamente 70 veces más que el oxígeno disuelto en el plasma. El oxígeno se combina débilmente y de forma reversible con la porción hemo de la hemoglobina. La presión parcial de oxígeno(PO_2) afecta la cantidad de oxígeno en combinación con la hemoglobina, de tal forma que cuando esta es alta en los capilares pulmonares, el oxígeno se acopla con la hemoglobina, pero cuando la presión parcial de oxígeno es baja como en los capilares musculares, el oxígeno se libera de la hemoglobina. Hay un aumento progresivo en el porcentaje de hemoglobina en combinación con el oxígeno cuando aumenta la PO_2 , desviando la curva de disociación de la

hemoglobina hacia la derecha (Lekeux 1993) La naturaleza de la curva tiene diferentes ventajas fisiológicas. La parte superior significa que pequeñas disminuciones en la PO_2 no afectarían seriamente la capacidad de la hemoglobina de fijar oxígeno, incluso si la PO_2 cayera ligeramente, la capacidad de fijar oxígeno se vería poco afectada. Además, cuando los eritrocitos toman el oxígeno en los capilares pulmonares, la gran presión parcial diferencial, entre el gas alveolar y la sangre continuaría existiendo aun cuando la mayor parte de oxígeno haya sido cedido, favoreciendo la difusión. La porción inferior de la curva de disociación significa que los tejidos periféricos pueden retirar grandes cantidades de oxígeno con solo una pequeña caída en la PO_2 en el capilar. El mantenimiento de la PO_2 en sangre ayuda la difusión de oxígeno en los tejidos (West 1995).

La curva de disociación de la oxihemoglobina puede desplazarse de tal forma que se altere la afinidad por el oxígeno. Los factores que regulan esta actividad responden a cambios en la concentración de CO_2 , temperatura de la sangre, pH sanguíneo, y concentración 2,3-difosfoglicerato. Cambios en el CO_2 sanguíneo y concentración de iones hidrogeno en sangre tienen efectos significativos en el aumento de la oxigenación de la sangre en los pulmones y liberación de la sangre a los tejidos por el efecto Bohr y representa un mecanismo por el cual el organismo asegura la rápida transferencia de oxígeno a los tejidos, al aumentar la intensidad del metabolismo.

El paso de oxígeno desde los alveolos a la sangre del capilar pulmonar esta mediado tanto por el aumento del gasto cardiaco como por el aumento de eritrocitos liberados por la esplenotomía. El almacenamiento de eritrocitos del bazo puede ser de un tercio a la mitad del número total de eritrocitos del caballo (entre 6 y 12 litros de sangre pueden estar acumulados en el bazo). De hecho, el reservorio esplénico es superior en caballos de deporte en comparación con otras razas con menor capacidad atlética. Esto hace que se

produzcan aumentos de hemoglobina de 1.7 veces en el ejercicio en relación al reposo.

II.4.1.2 Transporte de anhídrido carbónico.

El CO_2 es transportado en la sangre bien como CO_2 disuelto (5%), bien como ion bicarbonato (70/90%) o como compuestos carbanímicos. La mayoría del CO_2 es transportado como ion bicarbonato porque los eritrocitos tienen una alta actividad de anhidrasa carbónica que cataliza la reacción entre el CO_2 y el agua. Esta reacción enzimática hace posible la interacción del agua con grandes cantidades de CO_2 permitiendo el transporte de CO_2 hasta los pulmones en forma de bicarbonato, sobre todo durante el ejercicio donde el músculo libera grandes cantidades de CO_2 .

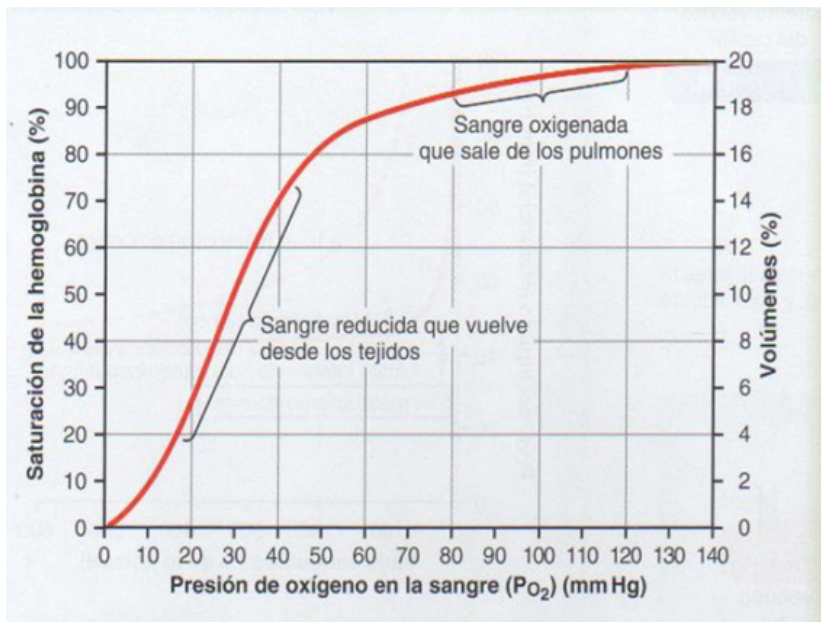


Fig. 9 Curva de disociación de la hemoglobina

Como se ha descrito anteriormente para el efecto Bohr, la presión parcial de CO_2 y el pH pueden limitar la unión del oxígeno con la hemoglobina. En caso contrario, el aumento de oxígeno puede actuar desplazando al CO_2 y a los iones hidrógeno de la hemoglobina, lo que se conoce como efecto Haldane.

La actuación conjunta de todos estos factores, respiratorios, cardiovasculares, y de transporte de oxígeno, se traduce en el consumo máximo de oxígeno $\text{VO}_{2\text{max}}$. Una mejoría de cualquiera de ellos o un empeoramiento, afectará a $\text{VO}_{2\text{max}}$. Además, este parámetro está determinado genéticamente, así como por el entrenamiento y el tamaño corporal. El $\text{VO}_{2\text{max}}$ en caballos de carreras está entre 180 y 200 ml de $\text{O}_2/\text{kg}/\text{min}$ y en caballos de resistencia es de 86 ml de $\text{O}_2/\text{kg}/\text{min}$ (Cotin y col 2010)

El **hematocrito** se define como el porcentaje de volumen de eritrocitos respecto al volumen plasmático de la sangre. Para calcular el hematocrito es necesario centrifugar la sangre. Una vez centrifugada los eritrocitos sedimentan, por encima de estos queda un pequeño halo blanquecino que corresponde a los leucocitos y plaquetas y como sobrenadante el plasma.

II.4.2 Las plaquetas

Son fragmentos de células anucleadas procedentes de los megacariocitos de la médula ósea que normalmente circulan en la corriente sanguínea durante 4-5 días. Las plaquetas interactúan con el endotelio y los factores coagulantes de la circulación en el mantenimiento de la homeostasis. Además, las plaquetas también están implicadas en los procesos inflamatorios e inmunológicos. Durante el reposo están retenidas en el bazo y por la contracción esplénica pasan a la circulación aumentando su número. Las plaquetas también se activan después de una herida del endotelio, por un manejo ina-

propiado in vitro y por un aumento del estrés en el sistema vascular. Cada uno de estos factores deben tenerse en cuenta cuando se evalúa tanto el número de plaquetas como su activación durante el ejercicio.

II.4.3 Los glóbulos blancos o leucocitos

Al igual que los eritrocitos y las plaquetas, provienen de células primordiales pluripotenciales, a través de dos líneas principales; la línea mieloide para los fagocitos y una línea linfoide para los linfocitos. En la sangre se encuentran cinco tipos de leucocitos diferentes: que se pueden agrupar en 2 grupos, los granulocitos que serían los polimorfo nucleares neutrófilos, eosinófilos y basófilos, y los agranulocitos que serían los monocitos y los linfocitos. La proporción de estos tipos de leucocitos en sangre se conoce como fórmula leucocitaria.

II.4.4 Respuesta al ejercicio

El ejercicio físico provoca una serie de respuestas hematológicas que son debidas a factores como, la hipoxia tisular, la esplenocontacción, la deshidratación y los cambios intercompartmentales de fluidos.

Con el ejercicio físico se produce una liberación de adrenalina, que actúa incrementando la frecuencia cardiaca y el volumen cardiaco, provocando por la esplenocontacción la liberación al torrente circulatorio de la sangre y de los eritrocitos almacenados, lo que conlleva un aumento en el número de hematíes, hematocrito y hemoglobina. Los efectos del ejercicio son debidos tanto a la intensidad como a la duración del mismo, viéndose también afectados por las condiciones medioambientales. El aumento del hematocrito después del ejercicio está en función de la intensidad del ejercicio. Hay una relación lineal entre el hematocrito y la velocidad hasta un máximo del 60-65%. Existen sin

embargo variaciones de la capacidad esplénica debido a la raza y a la edad del caballo (Rubio y col, 1995)

Mientras que la mayoría de los aumentos del hematocrito en ejercicios de alta intensidad son atribuibles a la contracción esplénica; durante el ejercicio de resistencia, donde se presentan grandes pérdidas de volumen plasmático por la sudoración, se presentan aumentos del hematocrito y de las proteínas plasmáticas que provocan un aumento de la viscosidad de la sangre (Muñoz y col 2008) que pueden llegar a producir una disminución del rendimiento.

Se han presentado trabajos en los que durante el ejercicio hay liberación de gran número de equinocitos, un tipo de glóbulos rojos pequeños y deformados por la deshidratación, aunque también hay trabajos en los que la concentración de equinocitos es baja. Estas diferencias pueden deberse a la intensidad y duración del ejercicio, que puede llevar a un estado de deshidratación, con alteraciones electrolíticas (Muñoz y col 2008) y también a la raza y la edad. (Rubio y col 1995). Para Muñoz y col (2008), las concentraciones bajas de sodio (menos de 133mmol/l), están relacionadas con el tamaño de los glóbulos rojos y con la presencia de equinocitos. Igualmente, Weiss y col (1994) encontraron aumentos en la concentración de equinocitos en animales tras la administración de furosemida, un diurético de asa que incrementa la pérdida de iones Na y K en la orina.

En los leucocitos, dependiendo del tipo de ejercicio, variará la fórmula leucocitaria, de tal manera que, en un ejercicio de intensidad, aumenta el número de linfocitos a consecuencia de la esplenotomía por la descarga de adrenalina, mientras que en un ejercicio de resistencia lo que aumenta son los neutrófilos a consecuencia de la descarga de cortisol y a la disminución de la migración de los neutrófilos de los vasos sanguíneos. (Escribano, 2005). No obstante, en ejercicios de resistencia con un aumento de velocidad al final,

puede aparecer un aumento de linfocitos, mientras que en algunos caballos extenuados puede aparecer linfopenia, al igual que en atletas humanos, lo cual es un factor de riesgo para el desarrollo de patologías infecciosas post ejercicio, fundamentalmente respiratorias.

II.4.5. Plasma Sanguíneo

Durante un ejercicio máximo, hay una esplenotransfusión máxima, una frecuencia cardiaca alta (que puede llegar hasta 240-250 lat/min) e hipervolemia asociada al entrenamiento; aumenta en gran medida la presión hidrostática intravascular, de forma que se produce una redistribución de fluidos y electrolitos hacia el tejido intersticial, condicionando un aumento de las proteínas plasmáticas totales y de la albúmina.

La magnitud de estos cambios parece estar relacionado con la duración e intensidad del ejercicio. Se han visto cambios leves en caballos de polo (Craig y col 1985) y en general en los caballos que realicen un ejercicio submaximo (Judson, 1983) mientras que los cambios son mayores en caballos PSI y en otras razas que realizan ejercicios máximos (Snow, 1985). Sin embargo, cuando aumenta la temperatura y la sudoración se hace más intensa, los cambios son más dramáticos y prolongados, como ocurre en caballos que realizan competiciones submáximas, como resistencia, doma o salto. En estos casos, la esplenotransfusión no es total, debido a unos requerimientos de oxígeno inferiores a los de carreras de velocidad y la variación de los fluidos corporales, va a venir determinada en gran medida por la termorregulación, sobre todo por la sudoración, con una reducción de la volemia.

El ejercicio puede modificar las diferentes fracciones de las proteínas plasmáticas, si bien estos cambios no se pueden atribuir únicamente a las variaciones del volumen plasmático. Se han en-

contrado concentraciones aumentadas de albumina plasmática en un 22 %, de fibrinógeno en un 12,5 % y en los diversos grupos de globulinas, entre un 25,5 a un 60%. Esto significa que hay una disminución del cociente albumina/globulina de un 10% en comparación con reposo. El mecanismo por el que se producen estos cambios tan heterogéneos, no está claro, pero pueden ser debidos a una redistribución compartimental, biosíntesis acelerada o degradación aumentada (Coyne, 1963). Además, la fibrinólisis inducida por el ejercicio puede jugar un papel limitando los aumentos en la concentración de fibrinógeno (Ferguson y col 1981).

En los ejercicios de baja intensidad y larga duración la concentración de albumina y proteínas plasmáticas totales aumenta (Muñoz y col. 2002, 2010; Castejón y col. 2006; Trigo y col. 2010). Si bien este incremento se ha asociado con una reducción de la volemia al inicio del ejercicio prolongado, existen evidencias de aumentos de volumen plasmático durante los estados iniciales de un ejercicio, por movilización de fluidos desde otros compartimentos hacia el compartimento intravascular (Persson 1967; Snow y col. 1982; Naylor 1993; Muñoz y col. 2017).

En parte, los cambios producidos por el ejercicio en la composición plasmática son debidos a los procesos de sudoración para la termólisis. Durante el ejercicio, el aumento de la sudoración puede llegar a ser de 10-15 litros por hora en ambientes calurosos (Hodgson y col 1993). Como resultado de la excesiva sudoración hay pérdida de agua sobre todo del compartimento extracelular con disminuciones del volumen de sangre y plasma (Hyyppa y col, 1996; Flaminio y Rush 1998). Estados de cierta deshidratación pueden encontrarse en caballos con éxito en carreras de resistencia, aunque un exceso de sudoración tiene consecuencias negativas en el rendimiento y en el estado general de salud. Una deshidratación severa puede llevar a estados significativos de déficit de electrolitos con calambres mus-

culares, desequilibrios acido-base, arritmias, disminución del rendimiento y eventualmente extenuación. (Foreman 1998; Muñoz y col. 2017).

Existen mecanismos neuroendocrinos implicados en la defensa de la homeostasis interna, que actúan asegurando un adecuado flujo sanguíneo a los músculos trabajadores y a otros tejidos vitales, así como la provisión de fluidos para la sudoración y la termorregulación. (McKeever y col, 1991,1992). El cambio en flujo sanguíneo, provoca un aumento de la liberación de renina, actuando sobre el angiotensinogeno circulante que es convertido en angiotensina I y después en angiotensina II, lo que estimula la producción de aldosterona de la corteza adrenal. La aldosterona actúa en la conservación de Na en el fluido extracelular y aumenta la absorción de Na y Cl desde el colon y riñón (Clarke y col 1992). Además la vasopresina es determinante en la excreción de agua e induce al riñón a retener agua, y junto con la angiotensina y la aldosterona provocan vasoconstricción y por lo tanto elevan la presión arterial (McKeever 1998; Muñoz y col 2010 a,b).

Asimismo, estudios previos han demostrado que los cambios en electrolitos y en los marcadores de hidratación son similares en caballos con éxito en competiciones de resistencia en diferentes distancias. (Barton y col, 2003; Castejón y col, 2006).

II.5 Sistema muscular.

El objetivo último de las adaptaciones a un esfuerzo físico es el aporte de oxígeno a la velocidad requerida por el músculo a medida que lo va necesitando al ir aumentando su actividad. Para que esto suceda, además de un correcto funcionamiento cardiovascular, es crucial la capacidad del músculo para extraer el oxígeno desde la

hemoglobina. De este modo, la falta de capacidad aerobia en el seno muscular se convierte como uno de los factores limitantes de mayor peso del rendimiento deportivo en caballos no entrenados (McMicken, 1983).

El músculo es un tejido heterogéneo, compuesto por fibras con distinta capacidad metabólica y contráctil (Brooker y Káiser, 1970). Básicamente existen dos grandes poblaciones fibrilares, tipo I o de contracción lenta, con un metabolismo oxidativo y tipo II o de contracción rápida, con un metabolismo más glucolítico (Rome y cols., 1990; Essen-Gustavsson y cols., 1997).

Estudios realizados de las isoformas de la cadena pesada de miosina han revelado la existencia de tres tipos de fibras puras denominadas tipo I, tipo IIA y tipo IIX, las dos primeras de metabolismo oxidativo y la tercera de metabolismo glucolítico, y dos tipos de fibras intermedias, tipo I+IIA y tipo IIAX, estas fibras se les considera como fibras de transición. (Rivero y col 1996b)

Las fibras tipo I son fibras con una capacidad oxidativa alta, un área pequeña, gran densidad capilar y mitocondrial y una baja capacidad glucolítica y de contenido en glucógeno, pero con una mayor cantidad de triglicéridos almacenados. Son fibras que realizan contracciones lentas y repetidas y que intervienen en el mantenimiento de la postura.

Las fibras tipo II son fibras de contracción rápida, con metabolismo oxidativo las IIA y glucolítico las IIX. Las fibras IIX tienen una alta velocidad de acortamiento, que triplica la de las IIA, por lo que se emplean preferentemente en ejercicios que requieran potencia de ejecución, pero durante un tiempo limitado dado su marcado metabolismo glucolítico con producción de ácido láctico. Las fibras IIA tienen gran número de capilares y alta densidad mitocondrial, y

están más adaptadas a ejercicios de velocidad para carreras de medio fondo. De acuerdo con la actividad y la duración de la marcha, las fibras musculares se van reclutando progresivamente. Durante la estación y a velocidades lentas se reclutan las fibras tipo I. A medida que la velocidad de la marcha aumenta se empiezan a reclutar las fibras IIA cada vez en mayor número, posteriormente a medida que aumenta la intensidad de ejercicio las fibras IIAX y por último las fibras IIX.

También se ha observado que la proporción los distintos tipos de fibras varía en los distintos músculos de acuerdo con su funcionalidad y también dentro de un mismo músculo, situándose las tipo I en el centro del músculo y las fibras IIX en la superficie. Según esta disposición las fibras tipo I tendrán una función predominantemente postural con contracción isométrica y las fibras tipo II una función propulsora con contracción isotónica.

Por otro lado se ha relacionado la capacidad de rendimiento con la población de los diversos tipos de fibras. De esta forma los caballos que tienen mayor rendimiento en carreras de resistencia tendrán una mayor población de fibras I y IIA mientras que los de mayor rendimiento en carreras de velocidad su población de fibras será de tipo IIAX y IIX.

La población de estos tipos de fibras puede variar con el entrenamiento, de tal forma que un entrenamiento aerobio pueda cambiar la población de fibras pasando las fibras IIX a fibras IIAX, de estas a fibras IIA, de estas a fibras I+IIA y de estas a fibras tipo I. (Serrano y col., 2000; Rivero y col. 2007)

II.5.1 Actividad enzimática muscular.

El análisis de las actividades de enzimas musculares clave

en las rutas metabólicas es un procedimiento habitual para el estudio de las capacidades oxidativa y glucolítica del músculo. En este contexto, las enzimas se dividen en dos grandes grupos. El primero de ellos integra a las enzimas aerobias, como la 3-OH-acil coenzima A deshidrogenasa (HAD), citrato sintasa (CS), malato deshidrogenasa (MDH) y succinato deshidrogenasa (SDH). La primera de ellas controla el flujo de sustratos a través de la β -oxidación de los lípidos, desde los ácidos grasos hasta acetyl CoA. Los tres restantes intervienen en los procesos de oxidación en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos. La mayor actividad de este grupo de enzimas indica mayor capacidad aerobia para la realización de un ejercicio y esto es característico de caballos de resistencia, por lo tanto, en disciplinas de raid y concurso completo de equitación.

El segundo grupo de enzimas, las glucolíticas, engloban a la hexokinasa (HK), la glucógeno fosforilasa (PHOS), la fosfofructokinasa (FPK) y la lactato deshidrogenasa (LDH). La HK actúa en la fosforilación de la glucosa de origen extracelular para su integración en el metabolismo fibrilar, la PHOS escinde el glucógeno en unidades glucosídicas, la PFK es la enzima clave en la regulación de la glucólisis convirtiendo la glucosa-6-fosfato a fructosa 1-6 bifosfato con gasto de ATP, y finalmente, la LDH cataliza el paso del piruvato hacia lactato. La mayor actividad de este grupo se da en caballos que realizan ejercicios de velocidad como en las carreras de cuarto de milla y en purasangre inglés de carreras así como en caballos que necesitan potencia en la realización de sus ejercicios como en disciplinas de salto y doma. (Blanco, 1995)

II.6. Sistema locomotor.

El caballo posee una locomoción muy eficiente energéticamente, ya que los músculos y tendones por sus propiedades elásticas tienen la capacidad de almacenar energía y utilizarla como la acción

de una catapulta, reduciendo a la mitad el esfuerzo durante el galope. El caballo ha modificado su anatomía, reduciendo la presencia de músculos en la parte distal de los miembros, mostrando su gran adaptación al medio, al tratarse de una especie cursorial.

El conjunto formado por músculos, tendones y ligamentos, les da la fuerza para generar la locomoción. Esta fuerza se ejerce de forma activa por la contracción muscular, y también por las fuerzas pasivas generadas por la elasticidad de tendones, ligamentos y fascias musculares. Durante la marcha en los diferentes aires, los tejidos elásticos almacenan la energía generada por la contracción excéntrica muscular para mantener la postura al tomar contacto las extremidades con el suelo. Es decir, el miembro actúa como un muelle, almacenando energía durante el apoyo y liberándola durante la suspensión del miembro, reduciendo enormemente el gasto energético ligado al desplazamiento. A mayor velocidad de marcha, mayor es el grado de contracción excéntrica, y por lo tanto mayor es la cantidad de energía almacenada en tendones y músculos. Esta energía ha de usarse sumándola a la energía metabólica generada para la contracción isotónica o concéntrica muscular, y genera la propulsión para desplazarse, bien hacia delante durante la carrera o bien hacia arriba durante el salto. (Rivero, J.L.; Hill, E.W. 2016).

El mecanismo de catapulta generado por la energía almacenada en los elementos elásticos del conjunto tendón-músculo, significa que los músculos bíceps y braquiocefálicos de las extremidades anteriores deberían tener cien veces el tamaño de lo que son, si tuvieran que generar la energía necesaria para el desplazamiento solo con la energía metabólica generada (Wilson A, Watson J, Lichtwark G. 2003)

El caballo utiliza para su desplazamiento tres aires básicos, el paso en las marchas lentas, el trote como una marcha de velocidad media y el galope donde desarrolla la máxima velocidad. Estos ai-

res consisten básicamente en ciclos de acortamiento y alargamiento muscular, que dan lugar al desplazamiento de las extremidades de forma cíclica. Cada ciclo se conoce en el caballo como tranco. En el tranco del caballo hay que considerar dos fases, una fase de apoyo y una fase de suspensión. Durante la fase de suspensión, se hace un movimiento vertical, de despegue y un movimiento longitudinal u horizontal de avance. Algunas razas equinas, como es el caballo Pura Raza Española, tiene un movimiento vertical más marcado, asociado a determinadas características anatómicas, como un metacarpo de menos longitud frente al brazo. Otras razas, como el caballo PSI y el Anglo-arabe, tienen un movimiento predominantemente longitudinal (Castejon y col 2009).

Además hay que considerar dos factores espaciotemporales, que determinan el tranco: la longitud y la frecuencia, cuya relación varía según el tipo de competición y de caballo y son determinantes del VO_v y del gasto energético, y cuyas alteraciones pueden ser indicativas de fatiga (Muñoz et al., 2006; Riber et al., 2006).

El desplazamiento dorsoventral del tranco hace referencia al movimiento en sentido arriba-abajo del centro de gravedad, el cual se encuentra situado en el caballo en la región precordial o zona de la cincha. Un desplazamiento dorsoventral mayor es una característica locomotora deseable para caballos de doma clásica y salto, pero no es favorable a caballos de velocidad y de resistencia, al suponer un mayor gasto energético con un menor avance. En los últimos años, existen evidencias científicas que avalan que el entrenamiento en una cinta rodante acuática, según la profundidad de agua elegida, mejoran este desplazamiento dorsoventral, siendo una recomendación importante para caballos de doma y salto (Muñoz et al., 2019; Saitua et al., 2020; 2022).

Como ya se ha señalado anteriormente, en el caballo, durante

el galope existe un acoplamiento del tranco con la ventilación pulmonar, de tal forma que la inspiración se realiza durante la fase de suspensión y la espiración durante la toma de contacto con el suelo. Este acoplamiento hace que a mayor duración de la fase de suspensión, mayor es la duración de la inspiración y por tanto hay mayor entrada de aire a los pulmones lo que significa mayor consumo de oxígeno. De aquí que los caballos con mayor longitud de tranco tengan mayor cantidad de oxígeno disponible y por lo tanto tendrán un mayor rendimiento en la carrera, como se ha comentado con anterioridad.

Como consecuencia de su selección natural en tiempos pasados y de su selección genética en tiempos más recientes, el caballo ha aumentado la utilización de su energía elástica en la locomoción disminuyendo el coste energético de su locomoción en relación a otras especies también consideradas atléticas, por lo que el caballo se puede considerar como el atleta por excelencia.

Las diferentes razas de caballos poseen diferentes características del tranco de acuerdo con sus necesidades deportivas. Por ejemplo, los caballos relacionados con las carreras tanto de velocidad como de resistencia tendrán una mayor longitud de tranco ya que su mecanismo locomotor está hecho para aumentar su velocidad, de tal forma que estos caballos tendrán aumentado el componente horizontal del tranco. Los caballos relacionados con las competiciones de doma, tendrán una menor longitud de tranco pero una mayor duración, ya que su componente vertical del tranco está aumentado para mejor desarrollar los ejercicios implicados en la reunión. La influencia de estos movimientos sobre el gasto energético ha sido comprobada en un estudio realizado con un grupo de caballos de raza Angloarabe y PRE (Castejón y col. 1994, Muñoz y col. 1999a). Desde un punto de vista energético, la respuesta locomotora al ejercicio fue más eficiente en los Angloarabes que en los PRE, ya que había

una correlación positiva entre el componente horizontal del tranco, la frecuencia de tranco y la longitud del tranco. Además la concentración de lactato en plasma tenía una correlación negativa con la longitud del tranco. En el grupo de caballos PRE, tanto la frecuencia de tranco como la longitud de tranco pueden limitar la velocidad, dada la correlación negativa encontrada entre ellas (Muñoz y col 1999a). También se observó que los valores de lactato y de frecuencia cardiaca eran superiores en los caballos PRE en comparación con los anglo árabes y que esto estaba relacionado con mayores valores del componente vertical del tranco en los caballos andaluces tanto en ejercicios realizados al trote como al galope. Por ello se puede concluir que el mayor componente vertical del tranco limita su longitud por lo que para mantener una determinada velocidad se produce un mayor gasto energético que se traduce con un aumento de los valores de frecuencia cardiaca y de lactato (Castejon y col, 1994; Muñoz y col 1999b). No obstante, hay que matizar dos aspectos en cuanto a estos resultados. En primer lugar, ambos grupos de animales realizaron el mismo tipo de ejercicio, consistente en cubrir diferentes distancias en una pista. En este aspecto, los caballos Angloárabes mostraron un patrón locomotor más eficiente. En segundo lugar, el patrón locomotor del caballo PRE es más adecuado para doma, si bien solo se consideraron los movimientos de elevación y avance en miembros anteriores y no posteriores, no siendo representativos del grado de reunión, ni tampoco otros parámetros del tranco, como simetría y regularidad.

El estudio de la simetría del tranco en el trote, es importante en la evaluación del diagnóstico de cojeras en las diferentes disciplinas, para garantizar la salud de los caballos que las desempeñan. Durante los últimos 10 años se han analizado los parámetros locomotores en caballos de resistencia con diferentes rendimientos en relación con las respuestas hematológicas y bioquímicas, para definir cuando aparece la fatiga y su influencia en las variables cinemáticas del tranco. Se trata

de presentar una información objetiva a los clínicos implicados en las competiciones de raid. Se estudiaron 75 caballos arábes y anglo-arábes que participaron en 4 raid. Comparando la duración del tranco en ambos bipedos derecho e izquierdo, se calculó el índice de simetría al trote (IDS) que permitió clasificar a los animales en dos grupos, simétricos y no simétricos. La relación entre el índice de simetría con parámetros hematológicos y metabólicos se perfiló como un método muy útil para diferenciar la fatiga fisiológica de la sobrecarga funcional, que contribuiría al desarrollo de claudicaciones. De aquí se propuso el uso del Índice de Simetría como método objetivo para el diagnóstico clínico de cojeras (Riber y col. 2006; Muñoz y col. 2006).

A partir de esta idea inicial, se han desarrollado sistemas de sensores de inercia, que determinan la simetría en los movimientos de cabeza, cruz, dorso y tuberosidades coxales. Si bien estos sistemas se han desarrollado para obtener unos datos objetivos sobre la intensidad de una cojera, son controvertidos en medidas límites, ya que algunos animales muestran asimetrías leves que no se pueden asociar a cojera. Igualmente, se ha visto que un porcentaje elevado de animales puede mostrar una asimetría locomotora leve con estos métodos, que perdura durante la competición, lo cual discrepa con animales que desarrollan claudicaciones, en los cuales la asimetría se va haciendo más marcada. Estos datos enfatizan la importancia de disponer de valores de referencia para cada individuo, dando lugar al estudio de una fisiología del ejercicio especializada e individualizada (García-Moll et al., 2022).

II.7. Termorregulación

La conversión de la energía química disponible en los alimentos, a energía para el trabajo muscular, tiene lugar en la célula muscular con una eficiencia de aproximadamente un 20 %, el 80% restante es liberado por el organismo en forma de calor. La producción de calor puede

aumentarse de 40 a 60 veces durante el ejercicio y es directamente proporcional al ritmo en que se utiliza el oxígeno.

Un caballo de 500kg. con un VO_2 max de 80 l/min, tiene una producción de calor metabólico de más de 400 kcal/min de ejercicio. La producción de esta cantidad de calor sin capacidad de disiparlo puede significar un aumento de la temperatura corporal a un ritmo de un grado por minuto durante el ejercicio. Durante ejercicios de resistencia, el ritmo de producción de calor es bajo, aunque el resultado puede ser alto por la larga duración del ejercicio realizado. Se ha estimado que la producción de calor en un caballo de resistencia que corre a una velocidad de 8 m/s es de alrededor de 150-200 kcal/min; si este calor no pudiera ser disipado el calor almacenado aumentaría la temperatura corporal en aproximadamente 21° C por hora. Esto nos indica la importancia que tienen los mecanismos de eliminación de calor y pone de manifiesto el impacto que supone realizar ejercicio para un caballo en condiciones ambientales desfavorables, como alta temperatura y humedad.

Un caballo Pura Sangre Inglés posee una masa muscular del 50% en comparación con otros mamíferos domésticos que poseen un 30-40% de su masa corporal total. El mayor porcentaje de peso corporal del músculo contribuye a una mayor masa específica de VO_2 del caballo cuando se compara con otras especies atléticas incluidos los humanos. Además un caballo corriendo usa una mayor proporción de su masa muscular para la locomoción de lo que hace un humano cuando corre. Por lo tanto la masa específica que se almacena en el caballo para el ejercicio es dos o tres veces más alta comparada con el humano. A pesar del mayor ritmo de producción de calor del caballo, el cociente área superficial/masa corporal es aproximadamente el 50% menos que el de un humano (McCutcheon y Geor 2008).

El intercambio de calor con el medio ambiente se produce fundamentalmente a través de la superficie corporal. El cociente en-

tre la masa corporal como indicativo de la capacidad para producir calor y el area de la superficie corporal como índice de la capacidad para disipar el calor es un dato importante. Si consideramos una persona de 80 Kg, el area de superficie corporal es de aproximadamente dos metros, lo que nos da un cociente $\text{area de superficie corporal (BSA)} / \text{masa corporal}$ de 1 a 40. En un caballo de 500 Kg el area de superficie corporal seria de 5 metros cuadrados, por lo tanto para el caballo el cociente entre el area de superficie corporal y la masa corporal sería de 1 a 100. Aunque el caballo es 6 veces mas pesado que el hombre solo tiene 2,5 veces más area superficial. En lo concerniente a la termoregulación, el caballo tiene que disipar 2,5 veces más calor a traves de cada metro cuadrado de superficie corporal, de lo que lo hace el hombre.

Existen diferencias entre razas, en el cociente entre area de superficie corporal y masa corporal. El PSI tiene un cociente de 1/90 mientras que las razas mas pesadas lo tienen de 1/120.

A pesar de esta desventaja del caballo con el hombre (1/100 para el caballo y 1/40 para el hombre), el caballo posee la ventaja sustancial de un mayor grado de sudoración, de tal forma que un caballo posee un ritmo de sudoración de 15 litros por hora mientras que el hombre solo es de 2 litros por hora. Naturalmente esta comparación no puede hacerse ya que el caballo y el hombre son de diferente tamaño. Si dividimos por el area de superficie corporal encontraremos que el ritmo máximo de sudoración para el humano equivale a 1 litro por metro cuadrado y por hora mientras que para el caballo equivale a 3 litros por metro cuadrado y por hora. Si este dato lo damos en unidades de mililitro por metro cuadrado y por minuto, tendríamos que para el hombre el ritmo de sudaración sería de 17 ml por metro cuadrado y por minuto y para el caballo sería de 50 ml por metro cuadrado y por minuto. Por lo tanto el caballo para compensar su gran masa corporal suda aproximadamente tres veces

más que el hombre por superficie de area corporal.

Podemos decir que el caballo es extremadamente eficiente en la disipación del calor producido durante el ejercicio. Por ejemplo, si el calor producido durante un raid de 160 Km no fuera disipado, la temperatura corporal aumentaría 3 grados por minuto o 15 grados por hora. (Como las competiciones de raid tienen una duración entre 8 y 12 horas, el aumento de temperatura estaría entre 120 y 180 °C). Durante un ejercicio intenso, como podría ser una carrera de caballos de 2500 mts ,la producción de calor sería muchísimo mayor, sin embargo como la duración del ejercicio es relativamente corta (2-3 minutos) la cantidad de calor almacenada sería muy pequeña (1,5 grados por minuto de ejercicio) con lo cual el aumento de temperatura estaría próximo a los 2-3 grados, lo que sugiere que la mayoría del calor producido sería preferentemente almacenado que disipado. (Marlin y Nankervis 2002).

La sudoración se produce por dos mecanismos diferentes: a) por aumento de la adrenalina circulante debido a la estimulación simpática y b) aumento de la temperatura de la piel que estimula a las glándulas sudoríparas. La estimulación simpática se produce tanto por la excitación al inicio de la carrera como durante el ejercicio mismo.

La evaporación completa de un litro de sudor disipa el calor producido durante 1-2 minutos de ejercicio máximo o 5-6 minutos de ejercicio submáximo.

El sudor del caballo es hipertónico o isotónico en comparación con el plasma, mientras que en el ser humano es hipotónico. Esto implica que junto a las perdidas de agua corporal hay que añadir la perdida de electrolitos.

La composición del sudor del caballo puede variar entre caballos entrenados y no entrenados y con el tiempo del ejercicio realizado. En un estudio se ha comprobado que la concentración de sodio del sudor, aumenta en los primeros 15 minutos de ejercicio, el potasio y las proteínas bajan y el cloro se mantiene igual. En el mismo estudio se vió que la composición del sudor era diferente en diferentes condiciones térmicas (McCutcheon y col. 1995).

Durante el ejercicio, el estímulo primario para el inicio de la sudoración son los incrementos en la temperatura corporal como resultado de la producción de calor metabólico. Normalmente la sudoración se inicia a una temperatura temporal específica y continua en proporción a su aumento. Hodgson y col (1993) demostraron que el aumento del ritmo de sudoración a tres diferentes intensidades de ejercicio (40%, 65% y 90% del VO₂ max) está estrechamente relacionado a la temperatura de la sangre de la arteria carótida (Hodgson y col 1993). El caballo posee una disposición anatómica por la cual sus arterias carótidas internas están envueltas por un par de bolsas gurgurales llenas de aire. Estudios preliminares sugieren que el caballo en ejercicio, puede usar sus bolsas gurgurales para enfriar la sangre en su ruta al cerebro. (Baptiste y col. 2000). Está asumido que esta pérdida selectiva de calor desde el tracto respiratorio superior, contribuye al enfriamiento selectivo del cerebro, ya que la temperatura de la sangre que llega al cerebro es menor que la temperatura de la sangre venosa mixta de la arteria pulmonar o a la del interior del músculo esquelético (McConaghy y col. 1995).

El ritmo del aumento de la temperatura corporal y la concentración de catecolaminas circulantes asociadas con diferentes intensidades de ejercicio puede contribuir también a determinar el ritmo de sudoración (Hodgson y col 1993).

II.7.1 Termorregulación durante el ejercicio

Durante el ejercicio, el calor producido en los músculos, es transferido a la superficie cutánea para su eliminación. Los termorreceptores periféricos de la piel, músculo esquelético, abdomen e hipotálamo detectan cambios de la carga térmica y producen una señal que es integrada en el hipotálamo para permitir la actividad efectora termoreguladora, particularmente por el sistema circulatorio y las glándulas sudoríparas. El mecanismo fisiológico primario para la pérdida de calor es el aumento del gasto cardiaco hacia la circulación cutánea y un aumento en el ritmo de secreción sudorípara. El aumento del gasto cardiaco y del flujo sanguíneo a los músculos, capacita un aumento sustancial de la transferencia de calor por convección desde los músculos. La circulación lleva este calor a el interior del organismo, aumentando la temperatura corporal. El aumento de la temperatura corporal y en menor medida de la temperatura de la piel, promueve la señal aferente para que de forma refleja se aumente el flujo sanguíneo cutáneo y la sudoración, con lo que se facilita la transferencia de calor a la piel y su disipación al medio ambiente por convección y radiación. La eficacia de la pérdida de calor por convección y radiación, depende del ritmo de movimiento del aire a través de la piel, y de la diferencia de temperatura entre la piel y el medio ambiente. El aumento del flujo sanguíneo cutáneo provee el calor latente para la evaporación del sudor así como el fluido requerido para la producción de sudor. Esto conlleva a una disminución del flujo sanguíneo esplácnico y del tejido adiposo (Hodgson, 1983) El aumento de las demandas de energía por el organismo aumenta el ritmo respiratorio y el flujo sanguíneo, con lo que se incrementa el enfriamiento por evaporación del sistema respiratorio.

Se han medido ritmos de sudoración de 20 a 55ml/m²/min en el cuello y espalda de caballos ejercitados en un treadmill (Hodgson DR 1993, Kingston 1979, McConaghy 1995). Esto correspondería a pérdidas de líquidos de 6 a 15 l/h, lo que supondría ritmos de sudoración de 2 a 3 veces mayores que en los señalados para el hombre.

En cualquier momento del ejercicio, la temperatura corporal refleja el balance entre el calor producido y disipado. Durante un ejercicio, cuanto antes predomine la producción de calor sobre la capacidad de disipación, antes se producirá un aumento de la temperatura muscular (Nadel, 1988).

Durante ejercicios de corta duración y alta intensidad, el ritmo de producción de calor puede ser superior al ritmo de disipación. En estas circunstancias, el ejercicio puede continuar hasta el fin, porque el calor acumulado puede disiparse durante el periodo de recuperación. De forma contraria, en los ejercicios de larga duración y baja intensidad, la producción de calor es más moderada, con lo que los mecanismos de disipación de calor pueden atenuar los aumentos de temperatura corporal. En los casos en los que las pérdidas de calor se incrementen hasta contrarrestar los aumentos de calor metabólico, se puede alcanzar un estado estacionario de temperatura corporal durante el ejercicio (Nadel, 1988).

II.7.2. Efecto de la temperatura ambiente.

Cuando la temperatura ambiente excede a la temperatura corporal. (35-36°C) el gradiente de transferencia de calor se invierte, y el caballo gana temperatura del medio ambiente. Si la humedad es baja, una disminución de la temperatura corporal puede conseguirse con aumento de la sudoración. Cuando la humedad aumenta, el gradiente de temperatura entre la piel y el medio ambiente se reduce y la evaporación del sudor se compromete. El caballo suda cada vez más pero la humedad alta no permite la evaporación del sudor por lo que no hay disminución de la temperatura corporal. Por tanto, una sudoración intensa en condiciones de humedad no es efectiva desde un punto de vista termorregulador. El ritmo de almacenamiento de calor cuando el ejercicio se realiza en condiciones de calor y humedad, puede ser de más de dos veces al realizado a la misma intensidad en

condiciones frías y secas (Geor,1995, Geor, 1998, Lindinger 1999)

Se ha documentado que el entrenamiento en el caballo reduce el umbral de sudoración, es decir, la sudoración se inicia precozmente, posiblemente en parte asociado a la mayor capacidad metabólica y adaptación rápida al ejercicio. Sin embargo, aunque las pérdidas hidroelectrolíticas en un caballo entrenado, bajo las mismas circunstancias medioambientales que un caballo no entrenado son superiores en ejercicio, durante la recuperación post-esfuerzo estas pérdidas se atenúan. De este modo, si se consideran las pérdidas hidroelectrolíticas totales, esto es, agrupando el ejercicio con el periodo de recuperación, son inferiores en el caballo entrenado.

II.8. Selección genética

Las características de rendimiento en el caballo son heredables y han sido objeto de selección por los criadores de caballos desde hace varios siglos. Se han reproducido caballos y yeguas de elite entre sí, en base a seleccionar individuos con los mejores tiempos de carrera, importancia y número de competiciones ganadas, así como dinero ganado en competición. Sin embargo, dado el carácter poligenético de estos caracteres, su heredabilidad es baja.

Es bien conocido que el gen miostatina está asociado a fenómenos de hipertrofia en gran número de especies mamíferas.

Recientemente, el uso de Polimorfismo de nucleótido único (SNP), permite identificar algunos genes interesantes ligados a características de rendimiento. También pueden usarse los SNP para genotipar un sujeto en relación a un fenotipo específico para la selección reproductora.

En una muestra de 112 caballos Pura Sangre Ingles se ha

identificado un gen de la miostatina, estrechamente asociado a caballos ganadores en carreras de distancias cortas y alta velocidad y largas y baja velocidad.

Investigaciones genéticas realizadas en Polimorfismo de nucleótido único (SPN), han encontrado que los caballos PSI con un genotipo C/C son los más aptos para carreras de corta distancia, de menos de 1600 metros, y alta velocidad, mientras que los de genotipo T/T son más aptos para la resistencia, en carreras de más de 2000 metros. También se ha comprobado que los caballos heterocigotos en ese locus (C/T), son los más aptos para las carreras de media distancia (Hill y col., 2010)

En caballos Cuarto de Milla, especialistas en carreras muy cortas entre los 400 y los 800 metros, el alelo C tiene una alta frecuencia, como resultado de la intensa selección llevada a cabo recientemente para mejorar la velocidad en esta raza (Petersen y col., 2013).

La miostatina esta implicada en la inhibición del crecimiento muscular a través de una regulación negativa, tanto en la proliferación del mioblasto como en su diferenciación. Algunos resultados sugieren que la regulación de la expresión génica de la miostatina, influyen la masa muscular y por lo tanto, el rendimiento de carrera, y el entrenamiento (Tozaki y col., 2011). A los seis meses de entrenamiento, los caballos con el genotipo asociado a la velocidad de distancias cortas (C/C) tienen el cociente masa corporal y altura a la cruz mas alto, mientras que aquellos asociados con le resistencia lo tienen mas bajo. Por lo tanto el genotipo C/C, en comparación con el T/T, promueve una mayor masa muscular, bien por una significativa supresión funcional o por disminución de su nivel de expresión (McGivney y col.,2010)

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

En la actualidad, al igual que en el hombre y otros mamíferos, en el caballo también se ha identificado un gen de la angiotensina (ACE) asociado con el rendimiento atlético que tiene un alto grado de heredabilidad, debido a la selección genética llevada a cabo durante varios siglos (Hamilton y col. PLoS ONE 2013).

He dicho, Muchas gracias.

III. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERA EI; RUBIO,D; VIVO,R; AGUERA, S; MUÑOZ, A;
CASTEJON, FM. (1995) "Heart rate and plasma lactate responses to training in Andalusian horses". *J.Equine Vet. Science.* 15 (12), 532-536.
- ATTEMBURROW DP, GROSS VA (1994). "The mechanical coupling of lung ventilation to locomotion in the horse". *Med. Eng. Phys* 16: 188-192.
- BAILEY, W.M. (1989)."The energetic basis of exercise".
En *Equine Sports Medicine.* Lea & Febiger. Philadelphia. 11-17.
- BAPTISTE KW, NAYLOR JM, BAILEY J, ET AL. (2000)
"A function for guttural pouches in the horse". *Natura* 403:382–383.
- BLANCO L. (1995). "Adaptaciones bioquímicas del músculo esquelético debidas al entrenamiento en caballos de raza

Española y arabe". En: Tesis Doctoral. Facultad de Veterinaria. Universidad de Córdoba.

- CASTEJON F. , RUBIO LUQUE, MD., SANTISTEBAN R., VIVO R., RIBER C. , AGUERA S., TOVAR P., AGUERA EI., ESCRIBANO B., MUÑOZ A., TRIGO P. (2009). Respuestas y adaptaciones fisiologicas al ejercicio en caballos de deporte. Biotecnologia. Universidad de Cordoba, ISBN: 978-84-691- 5270-6, Deposito legal CO- 919. 93-97.
- CASTEJON F. RIBER C., TRIGO P. (2004). "El equilibrio hidrico en el caballo de raid". *Revista de la Federacion Andaluza de Hipica*. 3, 10, 28-31.
- CASTEJON F., TRIGO P., MUÑOZ A., RIBER C. (2006). "Uric acid response to endurance racing and relationship with performance, plasma biochemistry and metabolic alterations". *Equine vet. J.* 0, 36, 70-73.
- CASTEJON FM., TRIGO P., REQUENA F., CASTEJON C., MUÑOZ A., SANTISTEBAN R., ESCRIBANO A., RIBER C. (2007). "Test ergoespirométrico en el caballo pura raza español". *Sanid. Mil.* 63(3) 248-249
- CASTEJON FM, RUBIO,D., TOVAR A., VINUESA M., RIBER C. (1994). "A comparative study of aerobic capacity and fitness in three different breeds (Andalusian, Arabian and Anglo-arabian)". *J. Vet. Med.A.* 41, 645-652.
- CASTEJÓN-RIBER C. , MUÑOZ A., TRIGO P., RIBER C., SANTISTEBAN R., CASTEJÓN FM. (2012). "Comparative ergoespirometric adaptations to a treadmill exercise test

- in untrained show Andalusian and Arabian horses". *Veterinary Research Communications*. 36(1), 41-46.
- CUDDEFORD D. (2012). "Factors affecting feed intake". In: Geor RJ, Harris PA, Coenen MC, editors. *Equine Applied and Clinical Nutrition*. London: Saunders Elsevier; 2013. p.64-79.
 - EATON MD (1994). "Energetic and performance. In: Hodgson DR, Rose R.J. eds. *The Athletic horse*. Philadelphia, D.A.: Saunders"; 49-61
 - ESCRIBANO B., CASTEJON F., VIVO R., AGUERA E., RUBIO MD. (2005). "Non specific immune response of peripheral blood neutrophils in two breeds (Anglo-Arabian and Spanish-Arabian): response to exercise". *Comparative immunology Microbiology and infectious diseases*. 28, 1, 145-154.
 - ESCRIBANO B., CASTEJON F., VIVO R., SANTISTEBAN R., AGUERA E., RUBIO MD. (2005). "Effects of training on phagocytic and oxidative metabolism of peripheral neutrophils in horses exercises in the aerobic-anaerobic transition area". *Veterinary Research Communications*. 29, 2 149-158.
 - FORD EJ, SIMMONS HA. "Gluconeogenesis from caecal propionate in the horse". *Br J Nutr* 1985;53(1):55-60.
 - FOREMAN JH, BAYLY WM, GRANT BD, GOLLNICK PD.

- (1990). "Standardized exercise test and daily heart rate response of Thoroughbreds undergoing conventional race training and detraining". *Am J Vet Res* 51, 914-920.
- FOX. E.L. Y MATHEWS D.K. (1981). "The physiological basis of physical education and athletics. Saunders College Publishing".
 - GAUVREAU GM, ET AL. (1996) "The relationship between respiratory exchange ratio, plasma lactate and muscle lactate concentrations in exercising horses using a valve gas collection system". *Can J Vet Res*;60(3):161–71.
 - GEOR RJ, HARRIS PA. (2013). "Laminitis". In: GeorRJ, Harris PA, Coenen MC, editors. *Equine Applied and Clinical Nutrition*. London: Saunders Elsevier; p. 469–86.
 - GEOR RJ, MCCUTCHEON LJ. "Thermoregulatory adaptations associated with training and heat acclimation. In: Hinchcliff KW, ed". *Veterinary Clinics of North America: equine practice; fluids and electrolytes in athletic horses*. Philadelphia: WB Saunders; 1998; 14:97–120.
 - GEOR R, MCCUTCHEON LJ. "Hydration effects on physiological strain of horses during exercise-heat stress". *J Appl Physiol* 1998; 84:2042–2051.
 - GUY PS, SNOW DH. "The effect of training and detraining on

- mus-
cle composition in the horse". J Physiol. 2013.;269(1):33–51.
- HILL, E.W., GU, J., EIVERS, S.S., FONSECA, R.G., MC-GIVNEY, B.A., GOVINDARAJAN, P., ORR, N., KATZ, L.M., MACHUGH, D.E., (2010). "A sequence polymorphism in MSTN predicts sprinting ability and racing stamina in thoroughbred horses". PLoS ONE 5, e8645.
 - HILL, E.W., MCGIVNEY, B.A., GU, J., WHISTON, R., MACHUGH, D.E., (2010). "A genome-wide SNP-association study confirms a sequence variant (g.66493737C>T) in the equine myostatin (MSTN) gene as the most powerful predictor of optimum racing distance for Thoroughbred racehorses". BMC Genomics 11, 552.
 - HODGSON, D.R. (1985). "Energy considerations during exercise". En "The veterinary clinic of North America. Equine practice." W.B. Saunders Company. Vol. 1 NO 3. 447-460.
 - HODGSON DR, MCCUTCHEON LJ, BYRD SK, ET AL. (1993) "Dissipation of metabolic heat in the horse during exercise". J Appl Physiol; 74:1161–1170.
 - HOLMES JR, ALPS BJ, DARKE PGG.(1966). "A method of radiotelemetry in equine electrocardiography". Vet Rec 79-90.
 - HOYT DF Y TAYLOR CR. (1981) "Gait and energetics of

- loco-
motion in horses". *Nature*; 292-239.
- HYYPPA S, SAASTAMOINEN M, REETA POSOA. (1999) "Effect of a post exercise fat supplemented diet on muscle glycogen repletion". *Equine Vet J Suppl*;30:493–8.
 - IRVINE CHG. (1958). "The blood picture in the racehorse. I. The normal erythrocyte and hemoglobin status: a dynamic concept". *J Am. Med Assoc.* 97-133.
 - JUEL C, ET AL (1999). "Lactate and potassium fluxes from human skeletal muscle during and after intense, dynamic, knee extensor exercise". *Acta Physiol Scand*;140(2):147–59
 - KALSEN GG, NADAJK EA. (1964). "Gas and energy exchange in breathing of trotters during exercise". *Ko-nevodsrovo* 11-21
 - KINDERMANN. W., SIMON, G., KEUL, J.(1979). "The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training". *Eur. J. Appl. Physiol.* 42: 25-34.
 - KINGSTON JK, GEOR RJ, MCCUTCHEON LJ. Rate and composition of sweat fluid losses are unaltered by hypohydration during prolonged exercise in horses. *J Appl Physiol* (1997); 83:1133–1143.

- KIENZLE E, POHLENZ J, RADICKES.(1997). "Morphology of starch digestion in the horse". J VetMed;44:207–21.
- KOHO NM, HYYPPA S, POSO.(2006). "Monocarboxylate trans-porters (MCT) as lactate carriers in equine muscle and red blood cells". Equine Vet J Suppl;(36):354–8.
- LEKEUX P. "Pulmonary function in healthy, exercising and disea-sed animals". Belgium: University of Ghent, (1993).
- LINDHOLM, A. BJERNELD, H. Y SALTIN, B. (1974). "Glycogen depletion pattern in muscle fibres of trotting horses. Acta Physiol. Scand. 90. 474-484.
- LINDINGER ML. "Exercise in the heat: thermoregulatory limitations to performance in humans and horses". Can J Appl Physiol 1999; 24:135–146.
- MARLIN D. Y NANKERVIS K. (2002). "Termoregulation". En Equine Exercise Physiology. Blackwell Publishing.
- MCCONAGHY FF, HALES JRS, ROSE RJ, et al. "Selective brain cooling in the horse during exercise and environmental heat stress". J Appl Physiol 1995; 79:1849–1854.
- MCCONAGHY FF, HODGSON DR, EVANS DL, et al. "Effects of two types of training on sweat composition". Equine Vet J1995; Suppl 18:285–288.

- MCGIVNEY, B.A., MCGETTIGAN, P.A., BROWNE, J.A., EVANS, A.C., Fonseca, R.G., Loftus, B.J., Lohan, A., MacHugh, D.E., Murphy, B.A., Katz, L.M., et al., (2010). "Characterization of the equine skeletal muscle transcriptome identifies novel functional responses to exercise training". BMC Genomics. Jun 23;11:398
- MCMIKEN, D.F. (1983). "An energetic basis of equine performance". Equine vet. J. 15. (2), 123-133.
- MILINOVICH GJ, BURRELL PC, POLLITT CC, et al. (2008). "Microbial ecology of the equine hindgut during oligofructose induced laminitis". ISME J ;2:1089–100.
- MORRICE-WEST AV, HITCHEMS PL, WALMSLEY EA, STEVENSON MA, WONG ASM, WHITTON RC. (2021). "Variation in GPS and accelerometer recorded velocity and stride parameters of galloping Thoroughbred horses". Equine Vet. J. 53(5): 1063-1074
- MUÑOZ A., RIBER C., SANTISTEBAN R., LUCAS R.G., CASTEJON F. (2002). "Effects of training durations and exercise on blood-borne substrate, plasma lactate and enzyme concentration in Andalusian, Anglo-Arabian and Arabian breeds". Equine vet. J. suppl.34, 34 245-252.
- MUÑOZ A., RIBER C., GÓMEZ-DIEZ M., CASTEJÓN F. (2013). "Interpretación fisiológica y clínica de las pruebas de esfuerzo en el caballo de deporte: Utilidad de la ergoespirometría". Equinus. 37, 6-23.,

- MUÑOZ A., RIBER C., TRIGO P., CASTEJON F. (2008). "Erythrocyte índices in relation to hydration and electrolytes in horses performing exercises of different intensity". *Com Clin Pathol.* 17; 213-220.
- MUÑOZ A., RIBER C., TRIGO P., CASTEJON FM. (2012). "Age and gender related variations in hematology, clinical biochemistry and hormones in spanish fillies and colts". *Research in Veterinary Science.* 93(2) 943-949
- MUÑOZ A., ROLDAN J., TRIGO P., GOMEZ-DIEZ M., SA-TUE K., CASTEJON-RIBER C. (2015). "Loss of performance in an endurance horse with erythrocytosis and colic during exercise". *J. equine vet. Sci.* Xx, 1-5.
- MUÑOZ A., CUESTA I., RIBER C., GATA J., TRIGO P., CASTEJON F.M. (2006). "Trot asymetryc in relation to physical performance and metabolism in equine endurance rides". *Equine Vet. J.* 36:50-54.
- MUÑOZ A., SANTISTEBAN R., RUBIO MD., RIBER C., AGUERA E.I., CASTEJON FM. (1999). "Locomotor response to exercise in relation to plasma lactate accumulation and heart rate in Andalusian and Anglo-arabian horses". *Veterinary Research Communications .* 23, 369-384.
- MUÑOZ A., SANTISTEBAN R., RUBIO MD., RIBER C., AGÜERA EI., CASTEJON FM. (1999). "Relationship between slope of the plasma lactate accumulation curve and working capacity in Andalusian horses". *Acta Vet. Brno* 68, 41-50

- NADEL ER. "Temperature regulation and prolonged exercise".
In:
Gisolfi CV, Lamb DR, Nadel ER, eds. Perspectives in exercise science and sports medicine. Exercise, heat, and thermoregulation. Dubuque, IA: Brown; 1988; 125–146.

- PERSSON S.G.B. Y ULLBERG. L.E.(1974). "Blood volume in relation to exercise intolerance in trotters". J. S. Afr. Vet. Assoc. 45: 293-299.

- PETERSEN, J.L., MICKELSON, J.R., RENDAHL, A.K., VALBERG, S.J., ANDERSSON, L.S., AXELSSON, J., BAILEY, E., BANNASCH, D., BINNS, M.M., BORGES, A.S., ET AL., (2013). "Genome-wide analysis reveals selection for important traits in domestic horse breeds". PLoS Genetics 9, e1003211.

- PETERSEN, J.L., VALBERG, S.J., MICKELSON, J.R., MCCUE, M.E., (2014). "Haplotype diversity in the equinemyosin gene with focus on variants associated with race distance propensity and muscle fiber type proportions". Animal Genetics 45, 827–835

- PETHICK DW, et al.(1993) "Nutrient utilisation by the hindlimb of thoroughbred horses at rest". Equine Vet J; 25(1):41–4.

- PÖSÖ AR, et al. (1989) "Exercise-induced transient hyperlipidemia".

- nia in the racehorse". Zentralbl Veterinarmed A; 36 (8): 603–11
- RIBER C., CUESTA I., MUÑOZ A. GATA J., TRIGO P., CAS-TEJON F. (2006). "Equine locomotor analysis on vet-gates in endurance events". Equine vet. J. o, 36. 55-59..
 - RIVERO JL, HILL EW. (2016). "Skeletal muscle adaptations and muscle genomics of performance horses". The Veterinary Journal 209 5-19.
 - RIVERO, J.L. Y PIERCY, R.J.. "Fisiología muscular: respuesta al ejercicio y al entrenamiento". En Medicina y cirugía en los equinos de deporte. Ed. Interamericana, (2007). pp 53-89.
 - ROSE, R.J. (1984). "Energy utilization during exercise and effect of training on equine skeletal muscle". Procc. of Am. Ass of Equine Pract. 29, 337-382.
 - RUBIO MD., MUÑOZ A., SANTISTEBAN R., TOVAR P., CASTEJON FM. (1995). "Comparative haematological study of two breeds of foals (Andalusian and Arab) subjected to exercise of progressive intensity". J. Vet. Med. Sci. 57(2); 311-315.
 - SCHRURS C, BLOTT S, DUBOIS G, VAN ERCK-WESTER-
GREN E, GARDNER DS, (2022). "Locomotor profiles in Thoroughbred: Peak stride length and frequency in training

and association with race outcomes". *Animals (Basel)*. Nov 24; 12(23):3269

- SIMMONS HA, FORD EJ. (1991) "Gluconeogenesis from pro-
pionate produced in the colon of the horse". *Br Vet J*;147(4):340–5.
- SLOET VAN OLDRUITENBORGH MM, WENSING T, BREUKING HJ. (1987). "Standardized exercise test on a track to evaluate fitness and training of Saddle horses". In: *Equine Exercise Physiology 2*. Eds. Gillespie JR, Robinson NE. California: ICEEP Publications 68-76.
- SMITH F. (1890). "The chemistry of respiration in the horse during rest and work". *J. Physiol.* 11, 65-78.
- SMITH F. (1896). "The maximum muscular effort of the horse". *J. Physiol.* 19, 224-226.
- SNOW, D.H. Y VOGEL, C.J. (1987). "Understanding energy and its relationship to performance". En "Equine Fitness. The care and training of the athletic horse." David & Charles. Newton Abbot. London. 71-85., to exercise training. *BMC Genomics* 11, 398.
- SNOW DH, et al. (1987). "Glycogen repletion following different diets". In: Gillespie JR, Robinson NE, editors. *Equine exercise physiology 2*. Davis, CA:ICEEP; 701–10.

- STEEL J.D. (1963). "Studies on the electrocardiogram of the race horses". Australasian Med. Publishing Co. Ltd, Syney.
- TRIGO P., CASTEJON F., RIBER C. MUÑOZ A. (2010). "Bio-chemical risk indicators of metabolic alterations in endurance horses". (2010). Equine vet. J. 42, 142-146.
- VALBERG, S. "Glycogen depletion patterns in the muscle of Standardbred trotters after exercise of varying intensities and duration". En Ph Uppsala Sweden, (1986). Fac. Vet. Med. SLU.
- VOTION DM, et al. (2007). "Muscle energetics in exercising horses". Equine Comp. Exerc. Physiol ;4(3/4):105–18. 55.-
- WEST JB. "Respiratory physiology — the essentials, 5th edn". Baltimore, MD: Williams & Wilkins; 1995
- ZUNTZ N. (1896). "Praktische Folgerungen aus den am arbeitspferd ausgeführten Stoffwechselforschungen". Zschr. Vetkde 8, 293-311
- ZUNTZ N. (1896). "Praktische Folgerungen aus den am Arb".
- ZUNTZ N UND LEHMANN C., (1889). "Untersuchungen v den Stoffwechsel des Pferdes bei Ruhe und Arbeit". Landwir-

¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?

thschaftliche Jahrbucher: Zeitschrift für wissenschaftliche
Landwirthschaft 18, 1-156.

- ZUNTZ N. UND HAGEMANN O. (1898). "Untersuchungen
van
den Stoffwechsel des Pferdes bei Ruhe und Arbeit". Landwir-
thschaftliche Jahrbucher: 27, Suppl III 1-438

CONTESTACIÓN AL DISCURSO DE
INGRESO EN LA REAL ACADEMIA
DE DOCTORES DE ESPAÑA DEL
EXCMO. DR.
D. FRANCISCO CASTEJÓN MONTIJA-
NO

POR EL ACADÉMICO DE NÚMERO
EXCMO. DR.

EXCMO. SR. DR. D. ALBINO GARCÍA SACRISTÁN

Excmo. Sr. Presidente

Excmos. señoras y señores Académicos

Señoras y señores

Por encargo y gentileza de nuestra Real Academia de Doctores de España, en nombre de la misma y siguiendo sus tradiciones, me veo en la agradable obligación de dar la bienvenida a su seno al profesor Don Francisco Castejón Montijano, catedrático de Fisiología en la Universidad de Córdoba.

Dados los muchos méritos científico-docentes que concurren en el nuevo académico, la tarea de hacer su laudatio parece fácil y sin especiales complicaciones, no obstante, dista mucho de serlo por la labor de síntesis que requiere el presentar, ante este dignísimo auditorio y en pocos minutos, el excelente, denso y variado curriculum vitae del recipiendario. Si a ello se añade la calidad científica del discurso que acabamos de escuchar y del que también he de hacer, por imperativo académico, un análisis crítico, comprenderán, Excmos. Sras. y Sres. lo comprometido de mi situación para glosar todas las capacidades, como docente e investigador, del Dr. Castejón y hacerlo, además, con objetividad y sin herir la modestia natural que le caracteriza.

El Profesor Francisco Castejón Montijano nace en Córdoba en el año de 1948, pertenece a una familia de ilustres catedráticos de universidad, tanto de veterinaria, como su abuelo Rafael Castejón y Martínez de Arizala, su padre Francisco Castejón Calderón, y su mujer Cristina Riber Pérez, de derecho como su tío abuelo Federico Castejón y Martínez de Arizala y de economía como su hermano Rafael Caste-

jón Montijano. Además, tanto su abuelo Rafael como su tío abuelo Federico, fueron Académicos de Número de la Real Academia de Doctores de España.

En este ambiente de excelencia universitaria que rodea al Dr. Castejón Montijano, su padre va a ser el maestro ejemplar a imitar. Permítanme hacer un pequeño comentario a la figura de su progenitor el profesor Castejón Calderón, eminente catedrático de Fisiología en la Facultad de Veterinaria de Córdoba. Entre sus numerosos estudios sobre la neurofisiología de los animales domésticos destaca el efectuado conjuntamente con los profesores Rodríguez Delgado y Santisteban García, sobre la conducta del toro de lidia con electrodos implantados en el cerebro. Un día de 1963, en el ruedo de un cortijo cordobés, el Dr. José María Rodríguez Delgado se plantó delante de un toro de lidia al que se le había implantado en el núcleo caudado de los ganglios basales cerebrales un electrodo que podía ser activado a distancia. Con sólo pulsar suavemente el botón del mando que activaba el electrodo, el toro se detuvo de golpe a sólo unos metros de Don José María; se había detenido la embestida del toro que permanecía plácido frente a él. Este estudio obtuvo una gran repercusión internacional, como la portada que le dedicó el New York Times el 17 de mayo de 1965. Escribía el Times, por la pluma de John A. Osmundsen, sobre el experimento: «La manifestación más espectacular jamás realizada de la modificación intencional de la conducta animal a través del control externo del cerebro».

Nuestro nuevo académico, el Dr. Francisco Castejón Montijano, realiza sus estudios de licenciatura en la Facultad de Veterinaria de Córdoba y su doctorado, gracias a una beca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en la Facultad de Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid bajo la dirección del Prof. Pedro Carda Aparici.

En 1978 obtiene por oposición la plaza de Profesor Adjunto de Fisiología en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba.

Durante los años de 1981 y 1982, y merced a una beca Fullbright que le concedió el comité conjunto Hispano-Norteamericano, se traslada a la Universidad Estatal de Ohio en Estados Unidos para estudiar la Fisiología del Ejercicio en el Departamento de Fisiología y Farmacología con el Profesor Robert L Hamlin. Durante esta estancia se le nombra Profesor Visitante.

De regreso a España obtiene por oposición la plaza de Profesor Agregado de Fisiología en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba, para en 1983 acceder a Catedrático de Universidad. Cargo que ha desempeñado hasta el año 2018, siendo en la actualidad Catedrático emérito de la Universidad de Córdoba y Académico de Número de la Real Academia Sevillana de Ciencias Veterinarias.

Ha sido Director del Departamento de Fisiología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba, así como Profesor Invitado durante varios años para impartir cursos de doctorado sobre Medicina Deportiva Equina en las Universidades argentinas de Rio Cuarto y de Buenos Aires.

Entre sus discípulos se encuentran 6 Catedráticos y 5 Profesores Titulares de Universidad, y ha desarrollado 21 Proyectos de Investigación competitivos, tanto nacionales como europeos.

Su actividad investigadora se ha dirigido al estudio de la Fisiología del Ejercicio y fundamentalmente a los mecanismos fisiológicos de las adaptaciones al ejercicio y al entrenamiento equino que permitan determinar y valorar su rendimiento. Consecuencia del trabajo experimental realizado ha sido la publicación de 220 artículos científicos, de los cuales 70 se encuentran publicados en revistas del primer

cuartil, la presentación de 142 comunicaciones en diferentes Congresos científicos y ha sido invitado como ponente en 15 Congresos Internacionales, ha dirigido 15 Tesis Doctorales y ha participado en la edición y coordinación de la obra “Fisiología Veterinaria”, libro de referencia en la mayoría de las Facultades de Veterinaria de España, Portugal e Iberoamérica, así como diversos capítulos en diferentes libros de su especialidad.

Desde el tiempo de los árabes, la ciencia ha tenido preferentemente dos funciones: habilitar para conocer e instruir para hacer. El Dr. Castejón se ha capacitado para ambas finalidades: conocer y hacer. Además de seguir la afirmación de su glorioso paisano el filósofo cordobés Séneca, quien decía: “nunca se descubrirá nada si estuviésemos satisfechos con lo descubierto”.

Por todo ello, si hay algo que haya satisfecho al Prof. Castejón Montijano en su actividad académica ha sido la creación del Centro de Medicina Deportiva Equina (CEMEDE), único Centro de su especialidad en España, tanto a nivel privado como público, destinado de forma exclusiva al estudio y mejora del caballo de deporte, del cual ha sido fundador, director y máximo responsable de su actividad hasta su jubilación. Este Centro surgió a petición del grupo de investigación liderado por el Prof. Castejón, que agrupaba a algunos miembros de los Departamentos de Fisiología Animal y Medicina y Cirugía Animal de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba.

Dicho grupo de investigación ha sido financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), por numerosos proyectos de investigación otorgados por la Junta de Andalucía y por la colaboración con empresas privadas, a través de contratos de prestación de servicios. Todo ello ha permitido dotar al CEMEDE de unas excelentes instalaciones que permiten mantener a un buen número de

caballos en boxes con videovigilancia, así como laboratorios, salas de exploración y estudio dotadas de modernos equipos técnicos como cintas rodantes terrestres y acuáticas, cámara hipóxica-normobárica, registro electrocardiográfico a distancia, en reposo y durante el ejercicio, sistemas de bioimpedancia eléctrica multifrecuencia para evaluar el equilibrio hídrico y nutricional, y los equipos necesarios para estudios fisiológicos, hematológicos y bioquímicos. Este Centro dispone también de sistemas de electroestimulación y de estimulación nerviosa transcutánea, ondas de choque extracorpóreas focales, ondas de presión radiales, radiofrecuencia y sistema de terapia física-vascular.

Las principales líneas de estudio son: evaluación de la forma física, diagnóstico de pérdida de rendimiento y potenciación del rendimiento deportivo, prevención de lesiones musculoesqueléticas, herrado, fisioterapia y rehabilitación. Esta investigación ha permitido realizar tesis doctorales, trabajos de fin de grado y de master, que han generado numerosas comunicaciones a congresos y publicaciones científicas.

El CEMEDE además de su actividad al estudio y mejora del caballo de deporte imparte un Master Oficial de la Universidad de Córdoba, denominado Medicina Deportiva Equina, único master de estas características en Europa. Debido a su especificidad, el Centro es un referente para la realización de conferencias y cursos no universitarios, destinados a la formación de técnicos deportivos, herradores, ganaderos, jinetes, entrenadores y cuidadores, vinculados al mundo deportivo ecuestre.

El Dr. Castejón en su discurso de ingreso: “¿Por qué el caballo es considerado especie atlética?” nos ha impartido una lección magistral sobre un tema que ha sido el argumento principal de su vida profesional. Lo ha elaborado acertadamente, teniendo en cuenta el

carácter multidisciplinar de esta Academia, describiendo desde los aspectos históricos a los fisiológicos y veterinarios, resaltando el papel fundamental que juega en las relaciones humanas.

El ser humano ha convivido con el caballo durante siglos, en las guerras que cambiaron la historia, en la cacería como deporte de los nobles y en el trabajo rutinario del campo. Pero hoy en día, cuando el caballo ha sido desplazado de muchas de estas tareas, no se ha perdido la afición por él. Es también fascinante comprobar cómo el caballo ha mantenido su importancia económica y social a través del tiempo. De ser un animal imprescindible en el trabajo durante miles de años, pasó a no ser necesario y reemplazado por las máquinas. Pero, afortunadamente para el caballo, hubo transformaciones en sus actividades y siguió una relación estrecha con la gente y el deporte.

El caballo es considerado como «el atleta élite» por excelencia entre todas las especies animales, ya que su gran adaptabilidad metabólica secundaria a la plasticidad de las fibras musculares y su excepcional capacidad cardiorrespiratoria le permiten desarrollar tanto la resistencia como la fuerza, cualidades necesarias para alcanzar un buen desempeño deportivo. Aprovechando estas cualidades anatómicas y fisiológicas innatas del equino, el hombre ha creado desde hace tiempo varias actividades deportivas en binomio jinete y caballo, como equitación de salto, alta escuela o dressage, carreras de velocidad, carreras a campo través o raids, polo, rejoneo y las exhibiciones de paso. Para cada modalidad deportiva existe una selección racial, debido a que la composición muscular es el principal factor determinante de la aptitud física del caballo, y la proporción de los diferentes tipos de fibras musculares en el equino están determinadas genéticamente. Así que se ha destinado preferencialmente a los caballos cuarto de milla para carreras de velocidad cortas, a los caballos purasangre inglés (PSI) para carreras de velocidad más prolongadas, a los caballos árabes para actividades de resistencia de

varios kilómetros, a los caballos trotones para carreras de trote y a los caballos de pura raza española (PRE), anglo-árabes, hannoverianos y criollos para el salto, doma, enganche, exhibiciones en pista en los aires de trocha, galope, trote, paso fino y también para los raids.

Estas características de velocidad, resistencia y fuerza requieren una coordinación neuromuscular excelente, con un sistema muscular bien desarrollado. En los mamíferos la masa muscular representa entre un 30 % y un 40 % del peso corporal. En un caballo de deporte bien musculado, esta masa muscular puede alcanzar hasta un 55 % del peso corporal. Se sabe que un porcentaje elevado del músculo, junto con una cantidad de grasa baja son adaptaciones propias de animales con una gran capacidad atlética. La importancia del músculo en el caballo de deporte se pone de manifiesto durante un ejercicio intenso, cuando el músculo llega a recibir hasta un 78 % del gasto cardíaco total.

Los músculos locomotores equinos están dispuestos estratégicamente de forma proximal al esqueleto apendicular. Esta disposición crea un efecto pendular durante el ejercicio y, al reducir el peso de la parte distal de los miembros, la energía necesaria para el desplazamiento disminuye. Los movimientos de la parte distal de los miembros son fundamentalmente pasivos y resultan de la liberación de energía elástica, que es almacenada en los tendones flexores digitales y en el ligamento suspensor del menudillo, cuando el miembro se encuentra en la fase de suspensión o de vuelo. Por el contrario, los movimientos de la parte proximal de los miembros se deben a la contracción muscular activa. Estas características ahorran energía durante la locomoción, mejoran la eficacia del movimiento y contribuyen a una mejor economía de carrera.

La capacidad atlética de los équidos viene determinada por factores genéticos, de entrenamiento, de edad y ambientales que incluyen: la

nutrición, superficie de la pista y el jinete. Este conjunto de factores van a generar una adaptación del organismo al ejercicio, con la particularidad de que el músculo esquelético es uno de los tejidos corporales más adaptables. Esta gran capacidad de adaptación ha dado lugar al término de plasticidad.

En las diferentes disciplinas deportivas, el entrenamiento físico no modifica las características morfológicas del equino, las cuales están determinadas genéticamente, pero sí mejora su capacidad de adaptación, ya que influye sobre algunos parámetros fisiológicos y sobre la capacidad funcional del animal. Los esfuerzos físicos repetitivos a través de un período largo de trabajo conducen a variaciones en las características contráctiles y metabólicas de las fibras musculares, así como en las funciones cardiovasculares y respiratorias, lo cual hace posible responder a la demanda metabólica exigida por actividad corporal específica, bien sea deportiva o de trabajo.

El principal factor limitante para alcanzar un buen nivel competitivo en los diferentes eventos, es el aporte nutritivo necesario a la célula muscular, determinado por la eficiencia del metabolismo energético. Por esto, es importante conocer el funcionamiento normal del metabolismo en el caballo atleta, pues sus adaptaciones fisiológicas al ejercicio exigen un excelente y cuidadoso manejo del entrenamiento, de la salud y de la alimentación por parte de los preparadores y los veterinarios, quienes deben trabajar conjuntamente para lograr el mayor rendimiento deportivo en estos atletas naturales.

Las fuentes de energía en el caballo son la glucosa y los ácidos grasos. La eficiencia con la cual estos sustratos proporcionan energía es mejor en animales que se encuentran bajo un programa regular de entrenamiento de resistencia, tanto en reposo como durante el ejercicio. En términos generales, los ácidos grasos volátiles, proveen más energía que la glucosa, pero su metabolismo es más lento, así

que, en reposo, una tercera parte de las necesidades energéticas en el equino son cubiertas por la oxidación de los carbohidratos y las dos terceras partes restantes son aportadas por la oxidación de las grasas.

Ahora bien, durante el ejercicio, la contracción muscular demanda un gasto de energía mayor que en condiciones basales, el cual varía considerablemente según el tipo, la intensidad y la duración de la actividad física realizada y del estado físico del animal, por ello, un buen rendimiento y desempeño deportivo dependen en gran parte, de un adecuado aporte energético a los músculos, el cual se obtiene de los sustratos provenientes del organismo y de la ingestión de nutrientes cuando se realiza una actividad física. Como hemos comentado anteriormente, la glucosa y los ácidos grasos son los principales sustratos utilizados por el equino para suplir la demanda energética, estos sustratos no son utilizados directamente por el músculo, sino que deben transformarse en adenosina 5'-trifosfato (ATP) para ser utilizados por la fibra muscular como aporte energético. La formación y el desdoblamiento, por la hidrólisis del ATP, son procesos continuos en el organismo, pero la velocidad de síntesis es mayor que la de hidrólisis en condiciones de reposo, mientras que durante el ejercicio ocurre lo contrario, predomina la hidrólisis por el aumento de la demanda energética.

Las adaptaciones respiratorias, cardiovasculares y hematológicas que ocurren durante el ejercicio adecuan los procesos de captación, transporte y difusión que van a permitir aportar oxígeno y sustratos energéticos a las fibras musculares, así como eliminar los productos de desecho metabólico.

La regulación y coordinación de estos sistemas, especialmente los ajustes respiratorios y cardiovasculares, se producen de forma rápida al comenzar el ejercicio. En esta respuesta inicial se incrementa la actividad del sistema nervioso simpático y se disminuye la acción

del sistema nervioso parasimpático. Un ejercicio más prolongado requiere unos mecanismos de regulación más estrictos y sofisticados, consistentes en la liberación de hormonas que intentan mantener la homeostasis para una función celular óptima. Esta regulación endocrina es más lenta que la nerviosa, ya que implica la síntesis y liberación de hormonas que serán transportadas a través del sistema circulatorio para actuar y adecuar los órganos diana a las exigencias que genera el ejercicio. Algunos de estos mecanismos de regulación siguen manteniendo su acción tras el cese de la actividad física, para promover la recuperación del equilibrio hidroelectrolítico y de las reservas energéticas celulares.

Como nos ha comentado el Prof. Castejón en su discurso la evaluación de la capacidad del potencial de esfuerzo de un caballo es un tema muy complejo, debido al considerable número de factores, endógenos y exógenos, que pueden actuar como limitantes o, al menos, como determinantes del rendimiento deportivo. El estado de forma física de un atleta depende de una función correcta e integradora de los sistemas orgánicos que determinan la concentración necesaria de oxígeno en el organismo, es decir, sistema respiratorio, cardiovascular y hematológico, junto con una eficacia locomotora y termorreguladora. En la actualidad existen medios tecnológicos que permiten determinar el estado de forma física de un caballo mediante una prueba de esfuerzo. Un test de ejercicio es un procedimiento diagnóstico (fisiológico y clínico) y de pronóstico, mediante el cual se realizan medidas objetivas de la funcionalidad de los sistemas orgánicos implicados directamente en el ejercicio físico.

Estimados y distinguidos académicos, el Dr. Castejón ha demostrado en su quehacer académico ser una persona trabajadora, intelectualmente impecable, que ha sabido desarrollar esa cuádruple actividad del gran maestro: aprender, enseñar, enseñar a aprender y enseñar a enseñar.

Aprender, porque a lo largo de su vida académica generó una fructífera actividad investigadora. Enseñar, ya que en sus 35 años de catedrático supo transmitir sus conocimientos a sus alumnos. Enseñar a aprender, formando investigadores y enseñar a enseñar, contribuyendo a que sus discípulos sean hoy prestigiosos profesores universitarios.

No quisiera terminar esta presentación sin hacer mención a personas que tanto representan y forman parte consustancial en la vida del Profesor Castejón Montijano, su mujer Cristina Riber, catedrática de Cirugía, que ha sabido compartir y comprender su actividad universitaria, sus hijos Francisco y Cristina y sus queridísimos nietos Francisco y Filomena.

Querido Francisco, ingresas hoy en una academia centenaria y te deseo futuros y renovados éxitos para que con tus saberes aportes lustre y brillo a la labor diaria de la Real Academia de Doctores de España y también con la obligación, como la de todos los académicos, de elegir para ocupar futuras vacantes a candidatos mejor que nosotros, porque de este modo la Academia será cada vez más grande y más útil. En nombre de esta docta Corporación y en el mío propio, te expreso nuestra más cordial bienvenida.

Muchas gracias por su atención.