

Gobernador central y ejercicio intenso

Francisco Javier Calderón Montero¹, Jesús Javier Rojo González²

¹Profesor titular de la Facultad de ciencias de la Actividad física y del deporte. INEF. Fisiología humana). ²Profesor titular de la Facultad de ciencias de la Actividad física y del deporte. INEF. Actividad física y salud).

La ergoespirometría es una "herramienta" de todos los laboratorios que se dedican a valorar la respuesta y adaptación del organismo al ejercicio y entrenamiento respectivamente, sea en personas sanas o con determinadas patologías. De manera esquemática se puede decir que la ergoespirometría ha tenido dos objetivos que se pueden clasificar del siguiente modo:

- Valorar a aquellas personas, que siendo presumiblemente sanas, desean conocer: 1º) si están en disposición de realizar ejercicio y 2º) si, descartada cualquier patología, se les puede cuantificar su grado de adaptación. De este objetivo, claramente se ocupa la Medicina Deportiva.
- Valorar a aquellas personas que teniendo una determinada sintomatología deben de ser evaluados a la hora de diagnosticar una posible patología. También la evolución o el pronóstico de una determinada enfermedad. Este objetivo es tributario de los diferentes servicios de Especialidades Médicas.

Ergoespirometría en medicina del deporte. Las pruebas de ergoespirometría a los deportistas de elite son de estricto cumplimiento desde el punto de vista de la prevención. El servicio de medicina deportiva del Consejo Superior de Deportes realiza de forma rutinaria, entre otras valoraciones, una prueba de esfuerzo a todos los deportistas de elite. Los resultados de tanto trabajo "en silencio" (no hay ningún "paper" que lo avale) han sido publicados en una publicación local¹ y en un libro². Naturalmente, no es el único laboratorio que se dedica a llevar a cabo ergoespirometrías, pero es de referencia por el tipo de población que estudia.

Ergoespirometría en otras especialidades médicas. En nuestro país, las pruebas de esfuerzo con objetivo diagnóstico han sido prácticamente patrimonio de la cardiología. Por lo menos, hasta hace relativamente poco tiempo. Paradójicamente, aunque con honrosas excepciones, los neumólogos, a mi juicio mejor capacitados para comprender el intercambio respiratorio, han dedicado

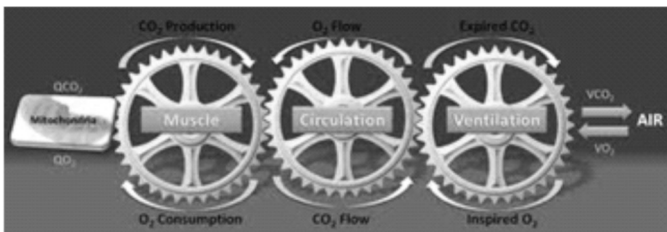
poco tiempo a las pruebas de esfuerzo neumológicas. Craso error, que ahora se está empezando a subsanar. Prueba de ello, son dos cuestiones. Primera, ya empiezan en los servicios de neumología a tener protocolos para la realización de pruebas de esfuerzo en enfermos respiratorios. Segunda, viendo este creciente interés, recientemente ha salido publicado un libro con un título muy elocuente: aparato respiratorio y actividad física. No obstante, el retraso en la aplicación de este método de valoración es notable. Como ejemplo de ello, el libro Wasserman, *et al.*, publicado en 1987 (primera edición) y renovado en 2011³. Cualquier persona que quiera dedicarse a las pruebas de esfuerzo debe, no sólo leer, sino *comprender* todos los casos clínicos tan bien preparados que están en ese texto.

Esta separación por objetivos (*medicina deportiva y especialidades médicas*) de ésta "herramienta" de valoración no debe tomarse en sentido estricto. Considero que el *especialista en medicina deportiva* es el que, de "atraerle" la fisiología del ejercicio, está más capacitado para llevar a cabo las pruebas de ergoespirometría con independencia del objetivo. Tal y como se lleva a cabo la enseñanza de ergoespirometría en la Escuela de Madrid, con todas las críticas que se puedan formular, y yo soy el primero en realizarlas, es adecuada para que el futuro especialista tenga el mínimo de formación. Desgraciadamente estamos fuera del ambiente sanitario, salvo raras excepciones, de manera que es difícil que el especialista aplique lo aprendido al campo de la valoración de determinadas patologías.

Realizada esta introducción, creemos que necesaria, veamos el "quid" de la cuestión: ¿Cuál es el significado fisiológico de una ergoespirometría?. La conocida figura de Wasserman o visiones integradas de la respuesta al ejercicio como las expuestas por autores escandinavos a mediados del siglo pasado⁴ o más recientes⁵ dan idea del carácter integrador de la ergoespirometría. Durante una prueba de esfuerzo convencional en la que se analiza

Correspondencia: Francisco Javier Calderón Montero
E-mail: franciscojavier.calderon@upm.es

el volumen y composición del gas espirado se obtiene información relevante del funcionamiento de: 1) aparato respiratorio, 2) sistema cardiovascular y 3) actividad metabólica en general y de la musculatura en particular. Pero es que, si además, durante la prueba se cateteriza un vaso sanguíneo (vena y/o arteria) aumenta notablemente la cantidad de información que se obtiene. Por ejemplo, se pueden conocer las concentraciones de determinados sustratos o productos disueltos en plasma o la concentración de hormonas. Así pues, a nivel elemental la ergoespirometría "cruenta" (invasiva como se dice en lengua anglosajona) constituye un verdadero paradigma para comprender la respuesta conjunta e integrada del organismo al ejercicio.



Ahora bien, por ejemplo, ¿Qué y cómo se dirige el movimiento de las tres ruedas dentadas perfectamente engrandadas?. Cualquier persona con un mínimo conocimiento de anatomía y fisiología contestaría que es el Sistema Nervioso Central (SNC) el encargado de ordenar el funcionamiento coordinado e integrado de las tres ruedas dentadas. Cuando los investigadores hablan del gobernador o comando central (GC) ¿a qué se están refiriendo?. La denominación en singular puede llamar a confusión. Es una "entelequia anatómica" y probablemente funcional. Anatómicamente, ¿se localiza en algunas de los engrosamientos del primitivo tubo neural: prosencéfalo, mesencéfalo, rombencéfalo o médula?, ¿en alguna de las estructuras derivadas de estos engrosamientos: telencéfalo, diencéfalo, mesencéfalo, metencéfalo, mielencéfalo o médula?, o ¿forman parte de estructuras constituyentes de cada una de las grandes divisiones del encéfalo formado (telencéfalo, diencéfalo, mesencéfalo, protuberancia, cerebelo, bulbo raquídeo o médula)?. La contestación a cualquiera de estas preguntas es, naturalmente, imposible de realizar en la actualidad y probablemente en el futuro. ¿Por qué decimos en el futuro?. Como se ha señalado anteriormente, y cualquier persona con unos conocimientos mínimos de neurofisiología puede corroborar, las relaciones anatomo-funcionales entre los diversos centros nerviosos constituyentes del encéfalo del adulto es tan íntima que no tiene sentido hablar en "singular".

Funcionalmente, alguno o algunos centros del encéfalo, en perfecta coordinación, pueden ser responsables de dirigir la respuesta del organismo al ejercicio. Al ser el ejercicio una fuente de estrés, todos los animales vertebrados poseen un SNC suficientemente desarrollado como para pensar en que existe una organización compleja de centros nerviosos que le permiten al animal moverse⁶. *los humanos no somos una excepción* respecto a la respuesta coordinada ante el estrés que supone el ejercicio.

De cualquier forma, como el concepto "director" que se le atribuye al GC no es nuevo, lo lógico, desde el punto de vista neurofisiológico, sería nombrarlo como ya lo hiciera Zunt y Geppert (en 1886), o Krogh y

Lindhard, en 1913! y finalmente se acuñó el término de comando central por Goodwin (1972)⁷. Fue denominado como "irradiación cortical". Esta denominación, aun no pudiendo explicar cómo se produce, está más próxima al probable funcionamiento del encéfalo durante el estrés que supone el ejercicio. No obstante, por más que conceptualmente nos resulte inadecuado el término GC, es un hecho que se constata al introducir el mismo en pubmed.

Es sobradamente sabido que cualquier aparato de ergoespirometría, por automatizado que sea, mide únicamente 5 variables⁵: Volumen corriente (V_T), Frecuencia respiratoria (B_R), Fracción espirada de oxígeno ($F_{E O_2}$), Fracción espirada de dióxido de carbono ($F_{E CO_2}$) y Frecuencia cardíaca (H_R). Igualmente, de esas variables fundamentales, mediante operaciones aritméticas simples, se obtienen una gran cantidad de información⁵. De estas variables derivadas, las más representativas son el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) y el umbral anaeróbico (AT), término éste último conceptualmente igual de equívoco que el GC.

Con independencia de la teoría del caos y desde el punto de vista práctico, la relación entre las variables básicas (V_T , B_R , $F_{E O_2}$, $F_{E CO_2}$ y H_R) y la intensidad obedecen a una función lineal ($y = ax + b$) hasta una determinada carga de trabajo. A partir de ésta adoptan diferentes comportamientos, pero todos se separan de la función lineal. Fisiológicamente, ¿Cómo se explica este cambio de comportamiento de las variables ergoespirométricas señaladas?. Decir que a partir de ese instante, concretamente el umbral ventilatorio 2 (VT_2) el organismo entra en una situación metabólica "insostenible" no es en realidad explicar porque el GC "ordena" dicho cambio. Para explicarlo, necesariamente hay que hacer mención, ahora sí, a la teoría del caos y su aplicación a variables biológicas.

La aplicación de la teoría del caos al análisis de la respuesta fisiológica compleja e integrada como es ejercicio incremental a partir del VT_2 se basa en conceptos y modelos dinámicos no-lineales. De las diversas variables fisiológicas medibles durante el ejercicio intenso (cardíacas, respiratorias etc), la variabilidad de la frecuencia cardíaca es el parámetro más y mejor estudiado desde hace aproximadamente 20 años⁸. Aunque objeto de discusión⁹, se piensa que la frecuencia cardíaca, analizada a través de métodos matemáticos no lineales, tiene un comportamiento caótico. Este comportamiento caótico se acentúa durante el ejercicio por encima del VT_2 como señalan algunos investigadores^{10,11}. En base a los estudios señalados, pensamos que la respuesta fisiológica a partir del VT_2 tiene características caóticas. Este comportamiento no lineal y caótico describiría que la respuesta del organismo a partir del AT se encuentra considerablemente limitada para intentar mantener el equilibrio entre el aporte y la utilización de energía.

De cualquier manera, esta explicación sigue siendo banal al objeto de conocer el "funcionamiento" del GC. Sigue siendo "especulación científica" con base a la teoría del caos. No da razón a como el GC organiza esta respuesta tan compleja y no lineal. Porque, en realidad, al analizar matemáticamente las variables ergoespirométricas, lo único que se analiza es la "salida" del GC. En términos neurofisiológicos elementales, se analiza la "eferencia" del GC, pero se desconoce por completo qué tipo de información aferente recibe el GC y lo que es más importante cómo opera el GC.

De cualquier forma, lo que parece claro, es que el ejercicio extremo (por encima del VT_2) constituye para el GC una situación de "estrés

extremo”, de manera que ordena una “salida eferente” diversificada por extraña que resulte. Así, por ejemplo, en 1963 Salminen y, Kontinen¹² señalaron los cambios que se producían en la composición de la saliva a consecuencia del ejercicio. Treinta años después, Chicharro *et al.*¹³ demostraron que el AT se podía detectar por el cambio iónico y de amilasa en la saliva. Desde el punto de vista de la realización del ejercicio, ¿qué sentido puede tener que a elevada intensidad se produzca una variación en la composición de la saliva?

Nuestra interpretación es que esta “salida eferente diversificada” ordenada por el GC tiene por objetivo conocer la proximidad que el organismo se encuentra al máximo de sus posibilidades y por tanto en peligro de fracaso de su homeostasis. Igualmente explicaría porque determinadas hormonas, como por ejemplo la STG (GH en la literatura anglosajona) son liberadas al plasma en concentraciones muy elevadas cuando su función no “guarda relación” con la realización del ejercicio. No obstante, y como se ha indicado anteriormente, esto es sólo una interpretación de lo realmente puede tener lugar en el GC.

Bibliografía

1. Rabadán M. La ergoespirometría en el alto rendimiento deportivo. Análisis, valoración y monitorización del entrenamiento de alto rendimiento deportivo. *Investigación en ciencias del deporte. Colección icd.* 2010;56:91-136.
2. Rabadán Ruiz M, Segovia Martínez JC. Pruebas de esfuerzo directas (cap 21). En: *Manual de valoración funcional: aspectos clínicos y fisiológicos.* Segovia Martínez, JC (editor) Elsevier España. D.L.; 2007.
3. Wasserman K, Hansen JE, Sue D Y. J.B. *Exercise testing and interpretation. Including pathophysiology and clinical applications.* Lippincott co., 5ª edition. December 2011.
4. Holmgren A. Circulatory changes during muscular work in man; with special reference to arterial and central venous pressures in the systemic circulation. *Scand J Clin Lab Invest.* 1956;8 Suppl 24:1-97.
5. Calderón FJ. Ergoespirometría: paradigma de análisis integrado de la respuesta del organismo al ejercicio, 335-346. En: *Fisiología humana. Aplicación a la actividad Física.* Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2012
6. Philip S. Ulinski. Vertebrate nervous system. En: *Handbook of physiology. Section 13: Comparative physiology.* Vol I edited by William H. Dantzler. American Physiological society. Oxford University Press, 1997.
7. Waldrop TG, Eldridge FL, Iwamoto GA, Mitchell JH. Central neural control of respiration and circulation during exercise (chapter 9). En: *Exercise, regulation and integration of multiple systems.* Rowell, Loring B (editor). American Physiological Society by Oxford University Press, 1996:338-46.
8. Borresen J, Lambert MI. Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med.* 2008;38(8):633-46.
9. Goldberger AL. Is the normal heartbeat chaotic or homeostatic?. *News Physiol Sci.* 199;6:87-91.
10. Cottin F, Medigue C, et al. Ventilatory thresholds assessment from heart rate variability during an incremental exhaustive running test. *Int J Sports Med.* 2007;28(4):287-94.
11. Sarmiento S, García-Manso JM, et al. Heart rate variability during high-intensity exercise. *Journal of Systems Science and Complexity.* 2013;26(1):104-16.
12. Salminen S, Kontinen A. Effect of exercise on Na and K concentrations in human saliva and serum. *J Appl Physiol.* 1963;18:812-4.
13. Chicharro JL, Lucia A, et al. Saliva composition and exercise. *Sports Med.* 1998;26(1):17-27.