

Monograph

Evaluación de la Oxigenación Intra-Muscular Durante el Ejercicio en Humanos

Fadıl Özyener¹¹Department of Physiology, Uludag University Medical School, 16059 Bursa, Turkey.

RESUMEN

En las últimas décadas se ha utilizado frecuentemente la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para valorar la oxigenación intra-muscular. En los últimos años la refinación del *hardware* del NIRS y de los algoritmos utilizados para convertir los cambios en la absorción óptica en cambios de concentración han incrementado la validez de las mediciones de la oxihemoglobina (HbO₂), deoxihemoglobina (Hb), mioglobina (Mb) y del compuesto oxidado de cobre en la citocromo aa3 (cyt aa3). Subsecuentemente, la utilización de NIRS para estudiar la oxigenación muscular durante la ejecución de diversos tipos de ejercicio y para monitorear las diferencias en los niveles de oxigenación en pacientes con diversas condiciones patológicas se ha incrementado. En el futuro sería interesante que los estudios combinen esta técnica con las técnicas de MRS y/o electromiografía para mejorar nuestra comprensión acerca de la oxigenación intramuscular.

Palabras Clave: espectroscopia de infrarrojo cercano, oxigenación muscular

INTRODUCCION

En el cuerpo humano, el oxígeno es consumido principalmente por las células musculares durante los procesos de producción de energía aeróbica, i.e., metabolismo oxidativo. La extracción del O₂ transportado en la sangre por las células musculares y el flujo sanguíneo dictan la tasa de utilización de O₂ (QO₂). La espectrometría de infrarrojo cercano (NIRS) es una tecnología relativamente nueva capaz de monitorear continuamente y en forma no invasiva los cambios en los tejidos (reservas de O₂ y disponibilidad de O₂ a nivel celular) (Piantadosi et al., 1986; Hampson et al., 1987; Jöbsis-Vandervliet et al., 1988). Esta técnica se basa en el hecho de que los tejidos biológicos son relativamente transparentes a la luz del infrarrojo cercano (longitud de onda entre 700-1000 nm) y por lo tanto la NIRS puede ser utilizada para medir la oxigenación muscular en tejidos con una profundidad de hasta 8 cm (Wilson et al., 1989; Chance et al., 1992). Por otro lado, la luz de la región visible (longitud de onda entre 450-700 nm) es fuertemente absorbida por los tejidos y por lo tanto no puede penetrar más de aproximadamente 1 cm de tejido.

En los tejidos biológicos, existen compuestos cuya absorción de la luz es dependiente del estatus de oxigenación. Dichos compuestos en los tejidos musculares son la hemoglobina oxigenada (HbO₂), la deoxihemoglobina (Hb), la mioglobina (Mb) y el compuesto de cobre oxidado de la citocromo aa3 (cyt aa3, el miembro terminal de la cadena de citocromos mitocondriales). Puede obtenerse información acerca del estado de oxigenación del tejido mediante la determinación de la concentración de oxígeno en estas variables. De esta manera, las características de absorción del infrarrojo cercano en los tejidos proporcionan información acerca de la presencia de estos compuestos en su interior.

La absorbancia de la deoxihemoglobina tiene su pico a la longitud de onda de 760 nm, mientras que la absorbancia de la oxihemoglobina tiene su pico a los 850 nm. El punto isosbético para la deoxihemoglobina y para la oxihemoglobina se produce a 798 nm (Chance et al., 1992; Mancini et al., 1994). Debido a que el espectro de absorción de infrarrojo cercano de la Mb se superpone con el de la Hb, los cambios en la saturación tisular monitoreados a 760 nm y 850 nm son atribuidos a la desaturación tanto de la Hb como de la Mb (De Blasi et al., 1993). Los estudios en preparados aislados de músculos han indicado que aproximadamente el 65-75% de la desoxigenación observada durante el ejercicio se debe a la liberación de oxígeno por la Hb, mientras que el balance se debe a la liberación por la Mb (Wilson et al., 1989; Chance et al., 1992).

En la práctica, se realiza la medición de la absorción a diversas longitudes de onda y se utiliza un algoritmo para convertir los cambios en la absorción óptica en cambios de concentración (Seiyama et al., 1988; Wilson et al., 1989). De esta manera es posible observar en forma gráfica los cambios que ocurren en las concentraciones de las diferentes variables de interés (e.g., en la Figura 1 se muestran las respuestas representativas de la HbO₂, Hb, HbT - hemoglobina total) durante un experimento, utilizando marcadores que permiten registrar puntos específicos (e.g., comienzo o final del ejercicio y MVC, etc.) que sirvan de futuras referencias.

La confiabilidad y validez de la NIRS para evaluar los niveles de oxigenación muscular durante el ejercicio han sido previamente establecidas (Wilson et al., 1989; Mancini et al., 1994; Sako et al., 2001). Una de las limitaciones de la NIRS es que no puede calcularse el consumo de oxígeno en músculos humanos intactos (mVO₂) debido a que no se puede cuantificar fácilmente la longitud del paso óptico de la señal de la NIRS (Mancini et al., 1994). Sin embargo, esta técnica puede proveer importante información acerca del perfil de oxigenación muscular durante el ejercicio y la recuperación. Además, esta técnica nos permite una mayor comprensión de los factores fisiológicos que influyen en el rendimiento cuando se combina con mediciones cardiorrespiratorias y metabólicas.

Diversos científicos han utilizado la NIRS para estudiar los perfiles de oxigenación muscular durante la realización de ejercicios progresivos y ejercicios ondulantes en diversas formas tales como ciclismo (Wilson et al., 1989; Chance et al., 1992; Mancini et al. 1994; Belardinelli et al. 1995a & 1995b; Matsui et al., 1995; Costes et al., 1996; Bhambhani et al., 1997; 1998; 2001), remo (Chance et al., 1992), ergometría de brazos (Jensen-Urstad et al., 1995; Ogata et al., 2002) y patinaje de velocidad (Rundell et al., 1997). Asimismo se han documentado los cambios agudos en la oxigenación muscular que ocurren durante la realización de ejercicios tales como prensión isotónica (Hamaoka et al., 1996; Kutsuzawa et al., 2001), levantamientos de pesas con las extremidades superiores (Tamaki et al., 1994), contracciones isométricas del antebrazo (Hampson and Piantodosi, 1988; De Blasi et al., 1993; Murthy et al. 1997) y extensiones de rodilla (Sahlin, 1992; Quarisema et al., 2001). En estudios clínicos, esta técnica ha sido utilizada para establecer las diferencias en la respiración muscular (Mancini et al., 1991) y en los niveles de oxigenación de los músculos activos (Wilson et al., 1989; Matsui et al., 1995) entre sujetos saludables y pacientes con insuficiencia cardíaca. De esta manera, parece que la NIRS puede ser una herramienta útil para la evaluación del rendimiento durante la realización de ejercicios.

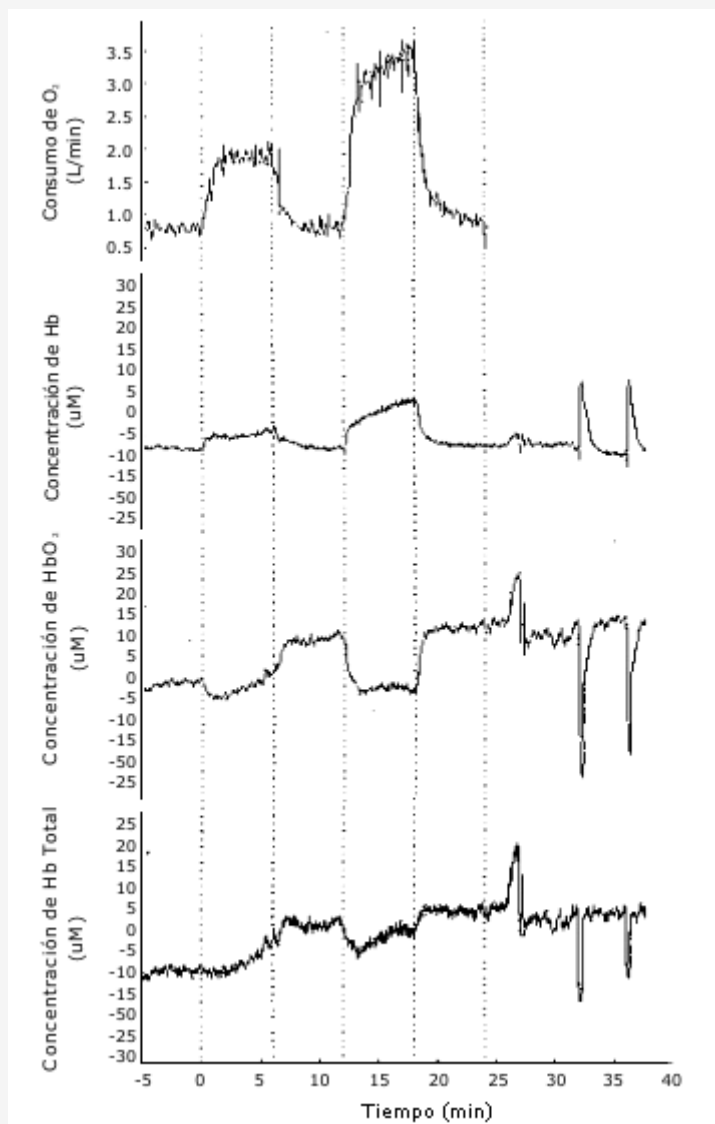


Figura 1. Comparación de los perfiles de VO_2 , Hb, HbO_2 , y HbT durante la realización de ejercicio con carga constante de intensidad moderada y alta

Perfiles de Oxigenación Muscular durante la Realización de Ejercicio a Niveles Sub y Supra Umbral de Lactato (θ_L)

Diversos experimentos se han llevado a cabo utilizando la técnica de NIRS con humanos realizando ejercicio para obtener información acerca de lo que ocurre dentro de los músculos con diferentes cargas de trabajo. Chance et al (1992) han realizado un extensivo análisis acerca del suministro y las demandas de oxígeno durante ejercicios casi máximos con el propósito de comprender las respuestas post ejercicio en términos del costo energético incurrido. Estos investigadores presentaron datos acerca de los cambios en la desoxigenación y en el flujo sanguíneo a medida que se incrementaba la carga de trabajo, comparando las señales de los diferentes músculos en forma simultánea.

Wilson et al (1989) examinaron los niveles de oxigenación en el músculo vasto lateral durante un test progresivo en cicloergómetro comparando sujetos saludables con pacientes con insuficiencia cardíaca. Estos investigadores examinaron las respuestas metabólicas provocadas por el ejercicio, específicamente la oxigenación, en un grupo de pacientes que sufrían de intolerancia severa al ejercicio debido a su condición patológica. En su estudio, pudieron demostrar que tanto los pacientes como los controles tenían similares niveles de desaturación de la Hb cuando llegaban al agotamiento, pero los pacientes con insuficiencia cardíaca alcanzaban este nivel antes que los sujetos de control.

Para utilizar eficientemente la NIRS para observar los cambios en la oxigenación intramuscular durante el ejercicio, es importante combinar esta técnica con el análisis de gases respiración por respiración. Combinando ambas técnicas,

Kawaguchi et al (2001) reportaron que la cinética de la oxigenación muscular periférica refleja el VO_2 sistémico. Belardinelli et al (1995a) examinaron la respuesta de desaturación del músculo vasto lateral durante cuatro períodos de ciclismo en estado estable a cuatro diferentes cargas de trabajo. Estos investigadores evaluaron si existía alguna evidencia que respaldara la hipótesis de que el componente lento del consumo de oxígeno con altas cargas de trabajo se relaciona con la desaturación progresiva de la hemoglobina, facilitado parcialmente por el efecto Bohr provocado por la acidosis láctica muscular. Este grupo de investigadores pudo demostrar una reducción en la saturación de oxígeno que ocurrió gradualmente con el incremento de la carga de trabajo. Además, con una carga de trabajo sub- θ_L el nivel de desaturación alcanzó un mínimo y se mantuvo constante e incluso comenzó a retornar a los niveles basales. Sin embargo, el nivel de desaturación continuó disminuyendo a través de todo el período de ejercicio con cargas supra- θ_L . En conclusión, estos resultados fueron considerados consistentes con la hipótesis planteada por los investigadores.

Belardinelli et al (1995b) también estudiaron la respuesta de la oxigenación intramuscular durante un test de ejercicio progresivo. En particular estos investigadores estudiaron el umbral de lactato (θ_L), evaluando si existía alguna relación entre el perfil de oxigenación intramuscular y el θ_L . Por lo tanto, investigaron la hipótesis de que la acidosis láctica causa un cambio en la curva de disociación de la hemoglobina y que esto está relacionado con el punto de quiebre de la esta curva. El umbral de lactato fue estimado mediante la técnica de pendiente en V y el tiempo al cual se producía el ΔL fue analizado para determinar si se producía una desaturación significativa en el músculo vasto lateral. Como se mencionó previamente, una limitación de la NIRS es que sin un experimento específico para determinar la longitud del paso óptico los resultados no son cuantitativos, y por lo tanto no pueden hacerse comparaciones entre individuos. Por este motivo, estos investigadores clasificaron los datos de la NIRS en referencia a los máximos y mínimos que registraron. Los resultados de este estudio indicaron que con el incremento progresivo en la carga de trabajo el nivel de oxigenación intramuscular se reducía. Interesantemente, estos investigadores fueron capaces de mostrar que la tasa de desaturación ocurría ligeramente antes que la detección del θ_L y por lo tanto propusieron que esta acelerada desaturación marca el comienzo de la acidosis láctica.

Bhambhani et al (1997) reportaron evidencia de cambios significativos en la señal de la NIRS al umbral de lactato. Estos investigadores diseñaron un estudio, utilizando NIRS y análisis de gases respiración por respiración, en el cual los sujetos realizaron tests de ejercicio progresivo en los cuales se utilizó la misma tasa de incremento en la carga para cada experimento. Este protocolo contrasta con el utilizado en el estudio de Belardinelli et al (1995b) en el cual se utilizaron diferentes tasas de incremento en la carga. Bhambhani et al (1997) demostraron cuatro fases de oxigenación durante uno de los tests progresivos de ejercicio, con una notable ausencia en aproximadamente la mitad de sus experimentos, de los componentes reportados por Belardinelli et al (1995b). Bhambhani y colaboradores también sugirieron que al comienzo del ejercicio hay un incremento transitorio en la señal de saturación de oxígeno que puede atribuirse al incremento del suministro sanguíneo hacia los músculos activos. Sin embargo, a medida que el ejercicio progresaba la sangre en el músculo vasto lateral comenzó a desaturarse progresivamente, hasta que alcanzó un nivel mínimo al momento del agotamiento. Además, estos investigadores indicaron que la caída en el nivel de saturación luego del incremento inicial, representa el punto en el cual *cruza* su nivel basal y que denominaron “*punto de cruce*”, aunque no es claro lo que realmente representa en términos fisiológicos. En este estudio, el umbral de lactato fue estimado utilizando el método de pendiente en V y se mostró que el θ_L ocurre en el mismo momento o justo antes que el punto en el que la señal del infrarrojo cercano cruza la línea basal.

Chance et al (1992) y Matsui et al (1995) también documentaron la tendencia de la NIRS durante el ejercicio como una respuesta de cuatro fases. Estos investigadores reportaron que en la fase I, con la carga cero de ejercicio, se producía un inmediato y rápido incremento en la absorbancia a partir de los valores de reposo, implicando un incremento en la oxigenación muscular. En la fase II, a medida que se incrementaba la producción de potencia, se producía una declinación estable en la absorbancia que continuaba más allá de los valores basales, lo cual sugeriría una reducción en la oxigenación muscular. En la fase III, las lecturas de la absorbancia tendían a nivelarse con el incremento en la producción de potencia hasta que se alcanzaba el $\text{VO}_{2\text{pico}}$. En la fase IV (durante la recuperación), se producía un rápido incremento en la absorbancia que se extendía por encima de los valores máximos observados en la fase I. esta respuesta, que ha sido atribuida a la hiperemia (Chance et al, 1992), tiende a nivelarse luego de los primeros 2-3 minutos de la recuperación.

Los resultados de todos estos experimentos son estimulantes, ya que muestran el potencial de la NIRS como un método no invasivo para detectar diversos eventos durante la evaluación del ejercicio siempre y cuando se utilice el dispositivo apropiado para evaluar la oxigenación intramuscular. Sin embargo, en estos estudios se utilizó el dispositivo “Runman” que provee una única estimación de la valoración infrarroja: no es posible, por ejemplo, utilizar este dispositivo para detectar la influencia del incremento en el volumen sanguíneo per se sobre el perfil de oxigenación (Chance et al., 1992; MacDonald et al., 1999). Por lo tanto, sería aconsejable utilizar el dispositivo NIRO 500 (Hamamatsu), que permite monitorear continuamente las concentraciones de deoxihemoglobina, oxihemoglobina y hemoglobina total en los músculos durante todo el experimento.

CONCLUSION

Interesantemente, casi todos los estudios citados previamente se han concentrado en las extremidades inferiores, particularmente en el vasto lateral. En general se asume que durante una cicloergometría, solo los músculos de las piernas trabajan mientras que los músculos de las extremidades superiores se encuentran en reposo. Hasta la fecha, solo unos pocos estudios se han concentrado en los perfiles de oxigenación de las extremidades superiores durante una cicloergometría (e.g. Özyener et al., 1999). Por lo tanto, la situación de "reposo" de las extremidades superiores todavía debe ser demostrada. Cualquier trabajo extra realizado con el tren superior podría contribuir a la aparición del componente lento del VO_2 y esto podría tener implicancias en nuestra comprensión de la energética muscular.

Por lo tanto, cabe señalar que la NIRS podría desempeñar un papel importante en la mejora del conocimiento científico respecto del metabolismo oxidativo en músculos saludables así como también acerca de los efectos patológicos sobre los tejidos musculares dañados. Los estudios futuros deberían combinar la NIRS con las técnicas de MRS y/o electromiografía para mejorar nuestra comprensión de la energética muscular y de los mecanismos de acople entre la oxigenación intramuscular y el consumo de oxígeno pulmonar.

REFERENCIAS

1. Belardinelli, R., Barstow, T.J., Porszasz, J. and Wasserman, K (1995). Skeletal muscle oxygenation during constant work rate exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 27: 512-519
2. Belardinelli, R., Barstow, T.J., Porszasz, J. and Wasserman, K (1995). Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infra-red spectroscopy. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 70: 487-492
3. Bhambhani, Y., Buckley, S. and Susaki, T (1997). Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 29 (3): 402-409
4. Bhambhani, Y., Maikala, R. and Buckley, S (1998). Muscle oxygenation during incremental and intense anaerobic cycle exercise in young men and women. *European Journal of Applied Physiology* 78: 422-431
5. Bhambhani, Y., Maikala, R. and Esmail, S (2001). Oxygenation trends in vastus lateralis muscle during incremental arm and leg exercise in men and women. *European Journal of Applied Physiology* 84: 547-546
6. Chance, B., Dait, M.T., Zhang, C., Hamaoka, T. and Hagerman, F (1992). Recovery from exercise induced desaturation in the quadriceps muscles of the elite competitive rowers. *American Journal Physiology* 262: C766-C775
7. Costes, F., Jean-Claude, B., Feasson, L., Busso, T., Geysant, A. and Denis, C (1996). Comparison of muscle near-infrared spectroscopy and femoral blood gases during steady-state exercise in humans. *Journal of Applied Physiology* 80: 1345-1350
8. De Blasi, R.A., Cope, M., Elwell, C., Safoue, F. and Ferrari, M (1993). Noninvasive measurement of human forearm oxygen consumption by near infrared spectroscopy. *European Journal of Applied Physiology* 67: 20-25
9. Hamaoka, T., Iwane, H., Shimomitsu, T., Katsumura, T., Murase, N., Nishio, S., Osada, T., Kurosawa, Y. and Chance, B (1996). Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *Journal of Applied Physiology* 81: 1410-1417
10. Hampson, N.B. and Piantadosi, C.A (1988). Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *Journal of Applied Physiology* 64: 2449-2457
11. Jensen-Urstad, M., Hallback, I. and Sahlin, K (1995). Effect of hypoxia on muscle oxygenation and metabolism during arm exercise in humans. *Clinical Physiology* 15: 27-37
12. Kawaguchi, K., Tabusadani, M., Sekikawa, Y., Hayashi, Y. and Onari, K (2001). Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen uptake?. *European Journal of Applied Physiology* 84: 158-161
13. MacDonald, M.J., Tarnopolsky, M.A., Green, H.J. and Hughson, R.L (1999). Comparison of femoral blood gases and muscle near-infrared spectroscopy at exercise onset in humans. *Journal of Applied Physiology* 86(2): 687-693
14. Mancini, D.M., Ferraro, N., Nazzaro, D., Chance, B. and Wilson, J.R (1991). Respiratory muscle deoxygenation during exercise in patients with heart failure demonstrated with near-infrared spectroscopy in humans. *Journal of the American College of Cardiology* 18: 492-498
15. Mancini, D.M., Ferraro, N., Nazzaro, D., Chance, B. and Wilson, J.R (1994). Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *Journal of Applied Physiology* 77(6): 2740-2747
16. Matsui, S., Tamura, N., Hirakawa, T., Kobayashi, S., Takekoshi, N. and Murakami, E (1995). Assessment of working skeletal muscle oxygenation in patients with chronic heart failure. *American Heart Journal* 129: 690-695
17. Murthy, G., Kahan, N.J., Hargens, A.R. and Rempel, D.M (1997). Forearm muscle oxygenation decreases with low levels of voluntary contraction. *Journal of Orthopaedic Research* 15: 507-511
18. Ogata, H., Yunoki, T. and Yano, T (2002). Effect of arm cranking on the NIRS-determined blood volume and oxygenation of human inactive and exercising vastus lateralis muscle. *European Journal of Applied Physiology* 86: 191-195
19. Özyener, F., Ward, S.A. and Whipp, B.J (1999). Contribution of arm-muscle oxygenation to the "slow-component" of pulmonary

- oxygen uptake during leg-exercise cycle ergometry. *Proceedings of Journal of Physiology* 515: p73
20. Quaresima, V., Homma, S., and Azuma, K (2001). Calf and shin muscle oxygenation patterns and femoral artery blood flow during dynamic plantar flexion exercise exercise in. *European Journal of Applied Physiology* 84: 387-394
 21. Rundell, K.W., Niola, S., and Chance, B (1997). Haemoglobin/myoglobin desaturation during speed skating. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 29: 248-258
 22. Sahlin, K (1992). Non-invasive measurements of O₂ availability in human skeletal muscle with near-infrared spectroscopy. *International Journal of Sports Medicine* 13: S157-S160
 23. Seiyama, A., Hazeki, O., and Tamura M (1988). Noninvasive quantitative analysis of blood oxygenation in rat skeletal muscle. *Journal of Biochemistry* 103:419-424
 24. Tamaki, T., Uchiyama, S., Tamura, T. and Nokana, S (1994). Changes in muscle oxygenation during weight lifting exercise. *European Journal of Applied Physiology* 68: 465-469
 25. Wilson, J.R., Mancini, D.M., McKully, K., Ferraro, N., Lanoce, V. and Chance, B (1989). Noninvasive detection of skeletal muscle underperfusion with near infra-red spectroscopy in patients with heart failure. *Circulation* 80: 1668-1674

Cita Original

Fadil Özyener. Evaluation Of Intra-Musclar Oxygenation During Exercise In Humans. *Journal of Sports Science and Medicine* (2002) 1, 15-19