

Manuscript Number:

Title: USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA MEDICIÓN DE LA SATURACIÓN DE
OXÍGENO MUSCULAR EN EL DEPORTE - USING NIRS TECHNOLOGY FOR MEASURING
MUSCLE OXYGEN SATURATION IN SPORT

Article Type: Revisión

Keywords: NIRS, saturación de oxígeno muscular, resistencia, fuerza,
programas de entrenamiento, recuperación.
NIRS, muscle oxygen saturation, endurance, strength, training programs,
recovery.

Corresponding Author: Mr. Carlos David Gómez-Carmona, D.

Corresponding Author's Institution: University of Murcia

First Author: Carlos David Gómez-Carmona, D.

Order of Authors: Carlos David Gómez-Carmona, D.; Alejandro Bastida-
Castillo, Graduated; José Pino Ortega, PhD

Abstract: Desde el descubrimiento realizado por el doctor alemán Karl von Vierordt en el año 1875 del cambio de color de la sangre en función de su oxigenación, numerosos investigadores han buscado la aplicación de esta tecnología para la medición de la cinética de oxigenación muscular y cerebral humanas en el ámbito médico. Posteriormente, gracias a la fabricación del primer dispositivo NIRS portátil para la medición de la oxigenación en el tejido muscular en el año 1994 realizado por Nakase y Shiga (Omron, Japón), estos dispositivos de fácil adhesión al cuerpo humano se han comenzado a aplicar en la investigación en el ámbito de la actividad física y el deporte para analizar los cambios de oxigenación muscular antes, durante y después del mismo. El objetivo de este trabajo ha sido revisar el funcionamiento de esta tecnología y las diferentes aplicaciones que se pueden realizar en el deporte como son la descripción de las exigencias oxidativas en deportes de resistencia y fuerza, la evaluación de programas de entrenamiento y tapering y la aplicabilidad para la mejora de la oxidación muscular en función de las técnicas empleadas en los procesos de recuperación post-entrenamiento.

Since the discovery by the German doctor Karl von Vierordt in 1875 of blood color change depending on its oxygenation, numerous researchers have sought the application of this technology for measuring the muscle and human brain oxygenation kinetics in the medical field. Later, thanks to the manufacture of the first portable NIRS device for measuring oxygen in muscle tissue in 1994 by Nakase and Shiga (Omron, Japan), these devices have begun to apply research in the field of physical activity and sport to analyze changes in muscle oxygenation before, during and after as is easy attachment to the human body. The aim of this research was to review the operation of this technology and the various applications that can be performed in sports like description of oxidative demands in endurance sports and strength, evaluation of training programs and tapering and applicability to improve muscle

oxidation depending on the techniques used in the process of post-workout recovery.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que han seguido los protocolos de su centro de trabajo sobre la publicación de datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

REVISIÓN

USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA MEDICIÓN DE LA SATURACIÓN DE OXÍGENO MUSCULAR EN EL DEPORTE

Gómez-Carmona, C. ¹ Bastida-Castillo, A. ² y Pino-Ortega, J. ³

¹ Graduado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Master en Alto Rendimiento en Deportes Cíclicos y Master en Investigación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Universidad de Murcia. cdgomezcarmona@gmail.com

² Graduado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Master en Investigación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Universidad de Murcia. alejandrobastidacastillo@gmail.com

³ Doctor en Facultad de Ciencias del Deporte. Universidad de Murcia. josepinoortega@um.es

REVIEW

USING NIRS TECHNOLOGY FOR MEASURING MUSCLE OXYGEN SATURATION IN SPORT

Gómez-Carmona, C. ¹ Bastida-Castillo, A. ² y Pino-Ortega, J. ³

¹ Graduated in Science of Physical Activity and Sport, Master in High Performance Cyclic Sports and Master in Research in Science of Physical Activity and Sports. University of Murcia

² Graduated in Science of Physical Activity and Sport and Master in Research in Science of Physical Activity and Sports. University of Murcia

³ Doctor in Sports Science Faculty. University de Murcia

USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA MEDICIÓN DE LA SATURACIÓN DE OXÍGENO MUSCULAR EN EL DEPORTE

RESUMEN

Desde el descubrimiento realizado por el doctor alemán Karl von Vierordt en el año 1875 del cambio de color de la sangre en función de su oxigenación, numerosos investigadores han buscado la aplicación de esta tecnología para la medición de la cinética de oxigenación muscular y cerebral humanas en el ámbito médico. Posteriormente, gracias a la fabricación del primer dispositivo NIRS portátil para la medición de la oxigenación en el tejido muscular en el año 1994 realizado por Nakase y Shiga (Omron, Japón), estos dispositivos de fácil adhesión al cuerpo humano se han comenzado a aplicar en la investigación en el ámbito de la actividad física y el deporte para analizar los cambios de oxigenación muscular antes, durante y después del mismo. El objetivo de este trabajo ha sido revisar el funcionamiento de esta tecnología y las diferentes aplicaciones que se pueden realizar en el deporte como son la descripción de las exigencias oxidativas en deportes de resistencia y fuerza, la evaluación de programas de entrenamiento y tapering y la aplicabilidad para la mejora de la oxidación muscular en función de las técnicas empleadas en los procesos de recuperación post-entrenamiento.

PALABRAS CLAVE

NIRS, saturación de oxígeno muscular, resistencia, fuerza, programas de entrenamiento, recuperación.

USING NIRS TECHNOLOGY FOR MEASURING MUSCLE OXYGEN SATURATION IN SPORT

ABSTRACT

Since the discovery by the German doctor Karl von Vierordt in 1875 of blood color change depending on its oxygenation, numerous researchers have sought the application of this technology for measuring the muscle and human brain oxygenation kinetics in the medical field. Later, thanks to the manufacture of the first portable NIRS device for measuring oxygen in muscle tissue in 1994 by Nakase and Shiga (Omron, Japan), these devices have begun to apply research in the field of physical activity and sport to analyze changes in muscle oxygenation before, during and after as is easy attachment to the human body. The aim of this research was to review the operation of this technology and the various applications that can be performed in sports like description of oxidative demands in endurance sports and strength, evaluation of training programs and tapering and applicability to improve muscle oxidation depending on the techniques used in the process of post-workout recovery.

KEY WORDS

NIRS, muscle oxygen saturation, endurance, strength, training programs, recovery.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, la tecnología aplicada a las ciencias de la actividad física y del deporte ha contribuido enormemente, por un lado, a su desarrollo en la investigación de base y de forma aplicada y, por otro, al control del entrenamiento del deportista. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es un método tecnológico para la medición de un gran potencial de posibles variables en diferentes ámbitos de estudio (agricultura, cardiología, neurología, ciencias del deporte, etc.) que lleva en funcionamiento desde los años 60 (Ferrari & Quaresima, 2012). Numerosos estudios experimentales han abordado la fiabilidad y validez de esta tecnología, así como las posibles aplicaciones que, de forma útil, pueden contribuir en cualquier campo de esta ciencia. En el ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte, se han publicado aproximadamente 300 artículos sobre el uso de la tecnología NIRS para medir la oxigenación muscular, que corresponde a su aplicación principal, durante el ejercicio físico (Ferrari, Muthalib, & Quaresima, 2011). A pesar de esta cantidad de estudios, sigue existiendo un gran campo de actuación con esta tecnología que pueda dar respuesta a incógnitas en el área de la fisiología del ejercicio, que por su complejo método de estudio, no se ha desarrollado su conocimiento de forma integral (López-Chicharro, & Fernández-Vaquero, 2006). Por ello, a modo de precursor, esta revisión pretende proporcionar información actualizada de los principales estudios que mantienen relación con la tecnología NIRS en el ámbito del deporte.

1.1. EVOLUCIÓN EN EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA NIRS EN ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE

Desde finales de la década de los ochenta, la tecnología NIRS se ha utilizado para investigar el metabolismo oxidativo muscular local en reposo y durante las diferentes modalidades de ejercicio. La ventaja de la utilización de esta tecnología, cuando se toman las precauciones necesarias para minimizar el movimiento del transmisor de señal, es que reporta valores muy interesantes a nivel oxidativo durante el ejercicio. Varios artículos de revisión informaron sobre los aspectos metodológicos de la espectroscopia NIR para la monitorización de la oxigenación muscular y la hemodinámica en humanos (Bhambhani, 2004; Boushel et al., 2001; Ferrari, Binzoni, & Quaresima, 1997; Hamaoka et al., 2007; Quaresima, Lepanto, & Ferrari, 2003).

El primer sistema de tecnología NIRS diseñado para el estudio muscular se desarrolló en la Universidad de Pensilvania en 1990. Nakase y Shiga (1994), desarrollaron en colaboración con Chance, el primer instrumento portátil de espectroscopia NIR de un solo canal para aplicación en estudios musculares (HE0-100, Omron Ltd. Inc., Japón) que fue comercializado hasta el año 2003 (Shiga, Tanabe, Nakase, Shida, & Chance, 1995; Shiga, Yamamoto, Tanabe, Nakase, & Chance, 1997).

En la tabla 1, se muestran las características de los diferentes técnicas de medición mediante espectroscopia NIR: CWS (Espectroscopia de onda continua), SRS (Espectroscopia de resolución espacial), TRS (Espectroscopia de resolución temporal) y PMS (Espectroscopia de fase modular); que

a lo largo de los últimos 20 años se han usado ∴ donde cada una de ellas presenta las siguientes ventajas e inconvenientes (Jue & Masuda, 2013):

Mediante el uso de la espectroscopia con los métodos detallados anteriormente para medir la oxigenación muscular durante el ejercicio, Ferrari et al. (2011) realizó una revisión en la que se exponen aproximadamente 300 artículos relacionados con esta temática centrándose en aspectos fisiológicos (principalmente hemodinámica y oxigenación muscular) en gran cantidad de músculos del tren superior e inferior usando principalmente instrumentos comerciales con los sistemas CWS y SRS. Los dispositivos de medición de la saturación de oxígeno muscular utilizados en las investigaciones realizadas en la actividad física y el deporte se disponen en la tabla 2.

Mediante esta tecnología se han analizado veinte del alrededor de seiscientos músculos de los que se compone el cuerpo humano mediante tecnología NIRS (Ferrari & Quaresima, 2012). En concreto, se han analizado específicamente:

Extremidades inferiores

- Musculatura analizada: bíceps femoral, gemelo interno y externo, recto anterior, tibial anterior, vasto lateral y vasto medio.
- Condiciones, deportes o ejercicios analizados: ciclismo, estimulación eléctrica, ejercicio de extensión de pierna, ejercicio de prensa para pierna, ejercicio de flexión plantar, carrera a pie, remo y test Wingate.

Extremidades superiores

- Musculatura analizada: Bíceps braquial, músculo braquiorradial, deltoides, flexores del antebrazo, tríceps braquial.
- Condiciones, deportes o ejercicios analizados: Abducción del brazo, press de banca, ciclismo, ejercicio flexión del codo, estimulación eléctrica, remo, test Wingate.

Musculatura del tronco

- Musculatura analizada: Erector de la columna, intercostales, multífido, paravertebral, serrato anterior.citar
- Condiciones, deportes o ejercicios analizados: Ciclismo, extensión del tronco y flexión del tronco.

Las variables analizadas mediante este método no invasivo han sido: (i) evaluar el consumo de oxígeno, (ii) el flujo sanguíneo, (iii) la re-saturación de oxígeno y (iv) el tiempo de recuperación en diversos grupos musculares anteriormente detallados en reposo, durante ejercicio físico y en la fase de recuperación de pacientes con enfermedades vasculares a nivel periférico y enfermedades neuromusculares (Hamaoka et al., 2007; Wolf, M., Ferrari, & Quaresima, 2007).

En el campo de la actividad física y el deporte, la espectroscopia NIR se ha aplicado para estudiar los siguientes aspectos:

- Daño muscular producido por el ejercicio (Ahmadi, Sinclair, Foroughi, & Davis, 2008; Muthalib, Lee, Millet, Ferrari, & Nosaka, 2010).
- Ergonomía y biomecánica (Maikala & Hargens, 2010).
- La heterogeneidad entre la reposición y demanda de oxígeno por los músculos esqueléticos (Koga et al., 2007; Saitoh et al., 2009).
- Activación muscular (Kooistra, de Ruiter, & de Haan, 2008; Muthalib et al., 2010).
- Ejercicio físico intenso (M. Buchheit, Laursen, & Ahmadi, 2009; Layec et al., 2009).
- Flujo sanguíneo de oxígeno en relación a la fatiga (Guenette et al., 2008; Vogiatzis et al., 2008).
- Influencia de la actividad neurológica en la fatiga muscular (Y. Bhambhani, Malik, & Mookerjee, 2007; Thomas & Stephane, 2007).
- El curso temporal del metabolismo oxidativo (Cettolo, V., Ferrari, Biasini, V., & Quaresima, 2007; Du Manoir, De Lorey, Kowalchuk, & Paterson, 2009).
- El efecto del entrenamiento en la oxidación muscular (McKay, Paterson, & Kowalchuk, 2009).

Según Ferrari et al. (2011) todavía existen incertidumbres en cuanto a las aplicaciones de la tecnología NIRS: (i) si puede ser utilizado en sujetos con una capa de grasa de gran espesor; (ii) si existe una variación de la medición de la tecnología NIRS durante el ejercicio debido a la modificación del flujo sanguíneo hacia dicha musculatura; y (iii) si existe unanimidad en cuanto al método de colocación, y demás factores referidos a su fiabilidad inter-temporal.

La gran perspectiva de los estudios de oximetría muscular será entender completamente la bioquímica, fisiología y patologías del músculo esquelético y su aplicación para mejorar la salud, el rendimiento deportivo y la recuperación en el proceso de rehabilitación.

1.2. FUNCIONAMIENTO Y PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TECNOLOGÍA NIRS

NIRS es un método de medición no invasivo de la concentración de oxígeno en sangre utilizando rayos de infrarrojo cercano. En sus orígenes fue comercializado en 1996 (Hitachi Co. Ltd.) básicamente para mostrar la actividad cerebral en neurología (Ferrari & Quaresima, 2012). Uno de los principios de base para la espectroscopia de infrarrojo cercano en el músculo en vivo es utilizar longitudes de onda en el intervalo de 700-850nm (Ferrari, Muthalib, & Quaresima, 2011) debido a que este rango tiene las características para una mejor penetración en el tejido biológico que la luz visible (Jobsis, 1977).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

En la figura 1 se muestra el principio básico por el que funciona la tecnología NIRS. La luz del infrarrojo cercano es transmitida hacia el cuerpo por el emisor y el receptor recibe esa luz una vez transportada por el cuerpo. La concentración de oxigenación se detecta como la hemoglobina en sangre, calculado por la ley de Lambert-Beer (Muramatsu y Kobayashi, 2013):

Donde I_{in} es la luz que entra hacia el musculo objetivo, I_{out} es la luz transmitida que pasa a través del cuerpo, D (mm) es la distancia, e [$1/mM*mm$] es el coeficiente de extinción, y C [mM] ($M:mol$) indica la concentración. Aunque debido a que en el uso real, existe una influencia de perturbaciones, tales como la aparición de movimiento fisiológico y la luz exterior, la ley de Lambert-Beer se modifica para su aplicación como se muestra a continuación:

Donde ΔI_{out} es el cambio de la luz transmitida que pasa a través del cuerpo, ΔC es el cambio en la concentración, y ΔS el cambio en el efecto de dispersión. Esta ecuación se denomina la modificación de la ley de Lambert-Beer.

Los variables que se registran mediante esta tecnología son oxi-hemoglobina/mioglobina (Hb/MbO_2), desoxihemoglobina/mioglobina (HHb/Mb), y hemoglobina/mioglobina total (tHb/Mb) (Ferrari et al., 2011). Así mismo, mediante esta tecnología también se pueden registrar los cambios relativos de estos parámetros como el equilibrio entre el O_2 ofertado y el O_2 consumido.

Por lo tanto, es necesario conocer la cantidad del suministro de O_2 al músculo para estimar el consumo de O_2 por dicho músculo (Ferrari, Mottola, y Quaresima, 2004; Sako, Hamaoka, Higuchi, Kurosawa, y Katsumura, 2001).

Según Cornachione, McLaren & Daniel (2014), NIRS es una técnica válida para medir mediante estimación la saturación de oxígeno muscular ($\%SmO_2$) que es la relación de la oxi-hemoglobina para la hemoglobina total en la sangre, expresado en porcentaje. Así, los cambios en SmO_2 durante el ejercicio están directamente relacionados con el balance entre la disponibilidad de oxígeno en sangre y el uso de ese oxígeno en los músculos activos (Cornachione et al., 2014).

En los últimos años, muchos investigadores han utilizado esta tecnología en sus investigaciones no solo con el fin de aportar conocimientos en fisiología del ejercicio si no también con la intención de definir su funcionamiento, así como describir los protocolos de utilización (Filligoi, 2007; Hesford, Laing, Cardinale, & Cooper, 2012; Kell & Bhambhani, 2006; Muramatsu & Kobayashi, 2013b; Rittweger, Moss, Colier, Stewart, & Degens, 2010; Scheeren, Schober, & Schwarte, 2012; Takafumi, S, Hiroyuki H, & Takayuki, H., en prensa; Yoshimatsu et al., 2013).

Si entendemos el patrón de la trayectoria de la luz de este dispositivo, (que mantiene una curva “en forma de plátano) en el que la profundidad de penetración en el tejido es aproximadamente igual a la distancia entre el emisor y el detector de luz (Pereira, Gomes, & Bhambhani, 2007), parece lógico que se haya encontrado que el tejido adiposo subcutáneo influye en gran medida la intensidad de la señal NIRS (Yoshimatsu et al., 2013).

1 Para corregir este efecto, Niwayama et al. (2002). han desarrollado un algoritmo de
2 corrección, de los que cuentan varios dispositivos NIRS en la actualidad Aún así, algunos estudios
3 miden la distancia que el tejido adiposo de sus sujetos interfiere en esta señal (Cornachione et al.,
4 2014; Sandbakk et al., 2015) siendo suficiente que esta distancia no sea superior al 50% de la distancia
5 que la señal NIR penetra en el tejido (Oueslati, Boone, & Ahmaidi, 2016).
6

7 En cuanto a los protocolos de colocación del dispositivo, en la gran mayoría de los estudios
8 reportan que deben ser ubicados en la porción media del vientre muscular (Hesford et al., 2012a;
9 Oueslati et al., 2016; Scott, Slattery, Sculley, Lockie, & Dascombe, 2014a; Xu, Mao, Ye, & Lv, 2011).
10

11 Otros estudios son más específicos situando el punto de colocación a 15 cm desde la grieta de
12 la rótula en el vasto lateral del cuádriceps (Scott et al., 2014a), otras marcas indican como referencia
13 10 cm del borde proximal de la rótula (Cornachione et al., 2014), o en la línea media del musculo
14 vasto lateral, un tercio de la distancia lineal entre el borde superior de la rótula y el pliegue inguinal
15 (Roberts et al., 2015). Por otra parte, otra indicación es colocarlo en el vientre lateral, entre el trocánter
16 mayor y el epicóndilo lateral del fémur (Jones, Hamilton, & Cooper, 2015). En el gastrocnemio, se
17 indica colocarlo sobre el vientre derecho, paralelo al eje mayor de la espinilla (Bringard, Denis,
18 Belluye, & Perrey, 2006).
19

20 Para evitar la contaminación de la señal lumínica, es necesario rasurar la zona de colocación
21 (Xu et al., 2011) y proteger el dispositivo, con algún material (como una venda) oscuro, de la luz
22 ambiental (Scott et al., 2014a).
23

24 En definitiva, NIRS ha sido utilizado por cantidad de investigadores para mostrar su viabilidad
25 para medir el consumo de oxígeno en tejido muscular (M. Ferrari et al., 2011; Marco Ferrari et al.,
26 2004; Pereira et al., 2007). Por lo tanto, diversas revisiones concluyen que esta metodología es válida
27 para ello y puede ser muy prometedora para profundizar el conocimiento científico sobre la cinética de
28 la saturación de oxígeno en tejido muscular (Pereira et al., 2007; Scheeren et al., 2012; Takafumi
29 et al., en prensa).
30

31 La saturación de oxígeno venosa en tejido muscular (SmO₂) puede estimarse mediante NIRS
32 aplicando una oclusión vascular para su calibración a cero y medir los cambios en oxígeno producidos
33 (Marco Ferrari et al., 2004), aunque también se puede utilizar directamente sin oclusión en tiempo real
34 durante la práctica de cualquier acción motriz en contextos de laboratorio y campo en tiempo real
35 (Cornachione et al., 2014).
36

37 **1.3. ¿POR QUÉ UTILIZAR LA TECNOLOGÍA NIRS PARA MEDIR LA** 38 **SATURACIÓN DE OXÍGENO MUSCULAR?** 39

40 **1.3.1. Bioquímica y fisiología del metabolismo oxidativo muscular** 41

42 El músculo esquelético utiliza tres importantes procesos bioquímicos para sintetizar adenosín-
43 trifosfato (ATP): la vía aeróbica mediante la fosforilación oxidativa (32-36 ATPs) y la vía anaeróbica
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

mediante la producción de ATP a través de fosfocreatina (PCr) (1 ATP) o a través del uso del glucógeno sin participación del oxígeno mediante la glicólisis (2 ATPs) (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006).

Durante el ejercicio físico, cuando este se realiza de baja a moderada intensidad, el músculo esquelético utiliza principalmente el metabolismo oxidativo, provocando durante la actividad física que su consumo de oxígeno (O₂) pueda elevarse hasta 50 veces, con aumentos bruscos en el transporte de O₂ (DO₂) de hasta 10 veces (Bhambhani, 2004).

Por lo anteriormente expuesto, debido a la dependencia del músculo esquelético en el metabolismo oxidativo, mejoras en este sistema crearán un mayor rendimiento en el deporte mientras que su pérdida limitará el rendimiento y llevará al sujeto a un deterioro funcional (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). Por todo ello, la medición de estos cambios oxidativos es un aspecto fundamental para el control tanto del rendimiento en deportistas como de la salud en personas con enfermedades que afecten al mecanismo de adquisición y transporte del oxígeno por el cuerpo humano.

1.3.2. Utilidad práctica de la tecnología de espectrometría de infrarrojo cercano (NIRS)

Hasta la aparición de la tecnología NIRS, diversos métodos invasivos han sido empleados para evaluar el metabolismo oxidativo muscular entre los que se incluían mediciones periféricas y cardiorrespiratorias. Entre las mediciones utilizadas destacamos los microelectrodos para medición de O₂ en tejidos, saturación de O₂ en mioglobina mediante análisis espectrofotométrico (Gayeski & Honig, 1983) y análisis del dinucleótido de nicotinamida y adenina (NADH) a través de espectroscopia de fluorescencia inducida por láser (Guezennec et al., 1991).

Por el contrario, la resonancia magnética espectroscópica (MRS) ha sido desarrollada para medir las formas activas en vivo de metabolitos de fósforo de alta energía y Ph intramuscular (Chance, Eleff, & Leigh, 1980; Gadian, et al., 1976). Desde entonces, MRS se ha convertido en el “gold standard” para la detección no invasiva de aspectos bioenergéticos del músculo esquelético. Sin embargo, MRS es una tecnología bastante cara y que requiere un mantenimiento muy cuidadoso para tener un control preciso.

La tomografía por emisión de positrones, microdialisis y la ecografía Doppler son otras modalidades para la medición del metabolismo aeróbico y anaeróbico (Shiga et al., 1995).

En comparación con las tecnologías anteriormente descritas, los aspectos positivos de NIRS para mediar el metabolismo oxidativo del músculo esquelético es su naturaleza no invasiva y portátil, además de que pueden hacer mediciones bioquímicas a intervalos frecuentes (desde 1 hasta más de 100 Hz) y pueden emplearse tanto en estudios de laboratorio y de campo (Jue & Masuda, 2013). Según Shiga et al. (1995), la capacidad de los dispositivos NIRS de recoger datos durante el

movimiento humano en tiempo real permitirá obtener información inmediata en situaciones de evaluación y control del rendimiento deportivo

1.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS

Como hemos visto anteriormente, la tecnología NIRS presenta unas características de utilización y funcionamiento que van a dotar de una serie de ventajas e inconvenientes en su utilización, para la consecución de datos de forma válida y fiable. Los aspectos positivos que presenta el uso de esta tecnología son:

- Es una técnica óptica no invasiva y segura que utiliza emisores de luz o diodos láser como fuente de luz y detectores NIRS para medir la oxigenación muscular (Jobsis, 1977).
- Los tejidos humanos son transparentes a la tecnología NIRS en la ventana espectral entre 650-1000 nm (Piantadosi, 2007).
- La luz NIR se absorbe perfectamente por los compuestos pigmentados de la piel (ej. hemoglobina). El espectro de absorción de la hemoglobina depende de su estado de oxigenación, siendo de color rojo cuando está oxigenada y de color azul cuando está desoxigenada (Ferrari & Quaresima, 2012).
- La técnica espectroscópica NIR ofrece información acerca de los cambios de oxigenación producidos en la sangre venosa debido a la profundidad a la que llega esta señal de infrarrojo cercano en el tejido (en un adulto puede estar entre 4-5 centímetros a nivel muscular). Por lo que del 100% de datos que esta capta, un 70% provienen de sangre venosa, un 20% de sangre capilar y un 10% de sangre arterial (Ferrari & Quaresima, 2012).
- Al tener una trayectoria óptica en forma de plátano abarca un mayor nivel de detección que la distancia entre el emisor y el receptor. Por lo tanto, a mayor distancia entre emisor y receptor, mayor profundidad de análisis hacia el interior del tejido humano (Pereira et al., 2007).
- La tecnología NIRS permite realizar una monitorización semicuantitativa/cuantitativa de medidas fisiológicas importantes (Hamaoka et al., 2007):
 - ✓ Oxihemoglobina (HbO_2).
 - ✓ Desoxihemoglobina (HHb).
 - ✓ Hemoglobina total (tHb) ($tHb = HbO_2 + HHb$).
 - ✓ Saturación de HbO_2 (SmO_2).
- La espectroscopía NIRS se caracteriza por una resolución temporal relativamente alta (típicamente entre 1 y 10 Hz, pero existen dispositivos con una resolución mayor de 10 Hz) que permite medir el curso temporal de cambios de oxigenación muscular (Ferrari, Mottola, & Quaresima, 2004).
- Esta tecnología tiene un precio relativamente bajo, es fácilmente transportable y móvil, se puede fijar a cualquier parte del cuerpo y el análisis de sus datos puede realizarse a posteriori si el dispositivo almacena los datos o de forma directa si el dispositivo se compone de alguna tecnología inalámbrica de transmisión de los datos (Ferrari et al., 2004).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

La utilización de esta tecnología para registrar las variables anteriormente descritas, permite incrementar el conocimiento científico. Actualmente existen dispositivos, que permiten registrar estas variables junto con otras como velocidad, aceleración, etc. La combinación de las variables oxidativas y las variables cinemáticas del movimiento humano permitirá a los investigadores tener un gran potencial de posibilidades en su utilización para el desarrollo científico, en este caso, en el de las ciencias de la actividad física y el deporte y la fisiología del ejercicio.

A la hora de realizar una investigación o en su uso para el control del entrenamiento y la competición, tanto en resistencia como en fuerza, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para el registro de los datos:

- Acoplamiento óptico con la piel. Este contacto debe de ser estable para que la fuente de luz NIR de onda continua penetre en el tejido y se reciba la información de forma adecuada. La estratificación y el color de pelo oscuro atenúan la luz NIR (Wahr, Tremper, Samra, & Delpy, 1996).
- Las medidas de este dispositivo están restringidas a la corteza externa o al tejido muscular superficial. La sensibilidad profunda del dispositivo depende de muchos factores (separación entre el emisor y el receptor, fuente de energía, sensibilidad del detector, propiedades ópticas de la piel, densidad ósea, el grado de mielinización de la materia, el espesor del tejido adiposo, etc). La mayoría de los dispositivos disponibles en el mercado tiene una gran sensibilidad a una profundidad media de 1,5 cm (Pereira et al., 2007)
- La determinación de los parámetros de la espectroscopia NIR está influenciada por los cambios de flujo/volumen de la sangre a la piel (Ferrari & Quaresima, 2012).
- La señal de la espectroscopia NIR no se corrige automáticamente por el software cuando se produce un movimiento del aparato de medición o una reducción de la penetración de la luz en la piel durante la investigación (Ferrari et al., 2004).
- No existe una normalización en el procesamiento de los datos de la señal captada por la tecnología NIRS. Los fabricantes deberían marcar unas pautas para su análisis (Ferrari et al., 2004)
- Se precisan de estudios que aúnen conclusiones en cuanto a su fiabilidad inter-temporal que, a priori, se está reportando como débil (Scott et al., 2014).

1.5. APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA NIRS EN EL TRABAJO DE RESISTENCIA

Una amplia variedad de técnicas y herramientas se han utilizado para evaluar la aptitud física de un individuo. La más común y aceptada es el consumo máximo de oxígeno (Billat, 2002). El uso de aire espirado, los principios de la ley de los gases (ej. La transformación de Haldane) y los principios energéticos y de trabajo muscular han hecho posible medir indirectamente el metabolismo energético utilizado durante el ejercicio (López-Chicharro y Fernández-Vaquero, 2006).

1 La primera investigación que utilizó la tecnología NIRS para el estudio de la energía utilizada
2 por el músculo humano en las ciencias del deporte fue el realizado en un grupo de remeros entrenados
3 en una simulación durante el entrenamiento de una prueba de 2000 m. (Chance et al., 1992). A partir
4 de este estudio, muchos investigadores comenzaron a buscar aplicaciones de esta tecnología en las
5 ciencias del deporte entre las que destacamos la aplicación para el control de la saturación de oxígeno
6 muscular durante el entrenamiento y la competición, la evaluación después de la aplicación de un
7 programa de entrenamiento o un período de tapering y el uso para la estimación de los umbrales
8 ventilatorios (VT1 y VT2) para la planificación del entrenamiento deportivo.
9

11 **1.5.1 USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS EN LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO** 12 **EN DIFERENTES ESPECIALIDADES DEPORTIVAS** 13 14

15
16 Por otro lado, la evaluación del entrenamiento de resistencia a nivel oxidativo mediante la
17 tecnología NIRS se ha utilizado, sobre todo, en deportes individuales para determinar su efecto a
18 través de dos variables: flujo sanguíneo y saturación de oxígeno muscular representadas por el
19 incremento de la oxihemoglobina (HbO₂) y la desoxihemoglobina (HHb). En la tabla 2 se muestran las
20 investigaciones que han utilizado esta tecnología agrupados por especialidad deportiva.
21
22

23 *Carrera a pie* 24 25

26
27 Quaresima et al. (1999) realizaron una investigación donde participaron de 10 sujetos atletas
28 entrenados a los cuales hicieron realizar sprints repetidos de 100 metros para determinar la
29 desoxigenación y reoxigenación muscular en ambas piernas. Para ello colocaron dos dispositivos
30 NIRS a cada sujeto en el vasto medio de cada una de las piernas. La conclusión que obtuvieron con
31 este estudio era la existencia de una diferencia estadísticamente significativa en la saturación de
32 oxígeno entre la pierna izquierda y la pierna derecha.
33
34

35
36 Por el contrario, Jones, Hesford, & Cooper (2013) realizaron un estudio en el que participan 6
37 jugadores de rugby universitarios. La finalidad era determinar diferencias en la oxigenación muscular
38 entre los sujetos sometidos a la realización de 9 circuitos cortos en los que debían hacer tramos de
39 carrera hacia delante, carrera hacia atrás y cambios de dirección. Los dispositivos fueron colocados en
40 los gemelos de ambas piernas. Los resultados que obtuvieron indican que no existen diferencias
41 significativas en la saturación de oxígeno muscular entre los sujetos participantes ni entre las dos
42 piernas de cada uno de los sujetos.
43
44

45
46 Demarie et al. (2001), a través del uso de esta tecnología, realiza un estudio donde participan
47 11 futbolistas varones de categoría amateur en un test hasta la extenuación a la intensidad del 100%
48 del VO₂max colocando dos dispositivos NIRS en los vastos laterales de ambas piernas. La conclusión
49 más importante determina que la desoxigenación del vasto lateral contribuye al desarrollo del
50 componente lento del VO₂ en carrera.
51
52

53 *Ciclismo* 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65

1 En el año 2001, Neary, Hall, & Bhambhani realizaron dos pruebas a 10 ciclistas entrenados
2 para determinar la influencia en la desoxigenación durante la práctica y la reoxigenación al finalizar.
3 Realizaron un test incremental para determinar su consumo máximo de oxígeno (VO₂max) y una
4 simulación de una contrarreloj de 20 km en dos sesiones separadas, para que no existiese influencia,
5 colocando el dispositivo en el vasto medio de ambas piernas. Los resultados obtenidos determinan que
6 se produjo una desoxigenación muscular mayor y una reoxigenación más lenta en la contrarreloj de 20
7 km sobre el test incremental máximo para determinar su VO₂max.
8
9

10 Posteriormente, Takaishi et al. (2002) utilizaron esta tecnología para determinar a través de la
11 oxigenación la experiencia de un ciclista y la influencia de la cadencia de pedaleo. En esta
12 investigación participaron 6 ciclistas profesionales, 6 triatletas amateurs y 6 sujetos sanos a los que
13 pusieron a pedalear al 75% VO₂max a distintas cadencias de pedaleo (50, 75, 85 y 95 rpm). Los
14 resultados obtenidos determinan que existían diferencias significativas en la oxigenación muscular en
15 función del grado de entrenamiento de los sujetos además de encontrar diferencias significativas en
16 función de la cadencia de pedaleo, aunque no determinaron cual era más eficiente ya que era
17 individual en cada uno de los sujetos.
18
19
20
21
22
23

24 En el año 2007, Dupont et al. realizaron una prueba consistente en 2 test Wingate, uno de 15
25 segundos y otro de 30 segundos separados por un descanso de 15 segundos. El descanso realizado
26 entre ambos esfuerzos máximos fue a las siguientes intensidades: (i) pasivo, (ii) activo al 20% de la
27 PAM y (iii) activo al 40% de la PAM. En el estudio participaron 12 sujetos entrenados. La colocación
28 del dispositivo NIRS se realizó en el vasto medio a una distancia entre 14-20 cm de la rodilla, para
29 determinar con cual supuesto era mayor la reoxigenación muscular y se alcanzaba mayor potencia en
30 el segundo test Wingate. Los resultados indican que la recuperación pasiva obtuvo mayor
31 reoxigenación y mayor potencia pico en el posterior test Wingate.
32
33
34
35
36
37

38 Por último, Jones et al. (2015) estudiaron el efecto del entrenamiento de sprint interválico
39 (SIT) en la oxigenación muscular. En esta investigación participaron 25 jugadoras de hockey olímpicas
40 separadas en grupo control y experimental. El grupo experimental realizaba 5 series de 30 segundos de
41 SIT antes y después de los entrenamientos. Los resultados muestran que este método de entrenamiento
42 aumenta la reoxigenación muscular periférica y que es un método efectivo de entrenamiento para
43 atletas de élite.
44
45
46
47

48 *Esquí*

49 En 2001, Szmedra et al. realizan una investigación para determinar la relación entre la
50 desoxigenación muscular en el área de sección transversal del cuádriceps en slalom y slalom gigante
51 con esquiadores entre 9 y 18 años. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que en el
52 slalom gigante (prueba con mayor recorrido) se produce un incremento de la desoxigenación por una
53 mayor participación del mecanismo de energía anaeróbico comprobado por un mayor índice de ácido
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

láctico en sangre. Además, también determinan que existe una mayor desoxigenación en el slalom gigante debido a una posición más baja del deportista que provoca una restricción del flujo sanguíneo.

Por el contrario, Im et al., 2001 no encontraron una mayor desoxigenación a un nivel de inclinación más alto durante un protocolo de 5 series de 4 minutos donde se manipulaba la altura y la velocidad de 8 esquiadores de fondo entrenados. Además, determinaron que existía una fuerte relación entre el porcentaje de desoxigenación y el consumo de oxígeno del organismo ($r=0,83$) por lo que puede ser supervisado con éxito mediante la tecnología NIRS.

Patinaje de velocidad

Hesford et al., (2012) realizaron una investigación con el objetivo de comprobar si existía diferencias oxidativas (pérdida de la oxigenación muscular) y sanguíneas (restricción del flujo sanguíneo) al adoptar una posición de sentado como defendió anteriormente (Szmedra et al., 2001). En este estudio participaron 6 patinadores de élite. Se realizó una prueba de simulación de 500 metros con el objetivo de comprobar tanto si afectaba la posición como si había diferencias de oxigenación entre ambas piernas. El resultado de este estudio indica que al principio de la prueba decreció el volumen sanguíneo muscular de igual forma en ambas piernas por la posición de sentado y en segundo lugar se vio una diferencia de oxigenación entre ambas piernas que se iba acentuando vuelta tras vuelta debido al giro ya que en las curvas casi todo el peso decae sobre la pierna izquierda.

Escalada

Philippe et al. (2012) realizó una investigación con el objetivo de determinar la influencia de la práctica de la escalada en la reoxigenación del flexor del dedo y la fuerza del mismo. En la investigación participaron 12 hombres y mujeres escaladores elite y 12 sujetos no escaladores. Primero, realizaron una contracción máxima voluntaria del dedo para determinar la fuerza máxima aplicable y a partir de ello realizaron un test intermitente en el que debían mantener el 40% de la fuerza máxima voluntaria durante 10 segundos, descansando 3 segundos entre esfuerzos. Los resultados de esta investigación determinaron una mayor fuerza y una mejor reoxigenación en los sujetos entrenados sobre los no entrenados.

Fútbol

En 2005, Hoffman et al. realizaron una investigación para determinar la importancia de la reoxigenación en deportes colectivos, en este caso concreto en fútbol. Participaron 10 futbolistas universitarios los cuales fueron evaluados en 4 ocasiones: antes del inicio de la pretemporada, al final de la pretemporada, a mitad del periodo competitivo y al final del periodo competitivo. Para comprobar la evolución del entrenamiento tanto en la potencia como en la oxigenación se utilizó un test Wingate de 30 segundos colocando un dispositivo en el vasto lateral de la pierna dominante. Los resultados obtenidos demuestran que conforme avanzaba la temporada los sujetos mantenían la misma

potencia pico, pero disminuían el tiempo de reoxigenación tras el esfuerzo que es determinante en los deportes colectivos.

1.5.2 USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA EVALUACIÓN DE PROGRAMAS DE ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA Y FASE DE TAPPERING

Una de las diferentes utilidades del uso de la tecnología NIRS ha sido la evolución a nivel oxidativo de la aplicación de diversos programas de entrenamiento y tapering. En la tabla 3 se exponen las investigaciones revisadas sobre esta temática

En la investigación realizada por Costes et al., (2001) se analizó la influencia de un programa de entrenamiento durante en la saturación de oxígeno muscular, la densidad capilar muscular, el consumo de oxígeno y el metabolismo muscular, donde participaron 7 sujetos entrenados. Durante las 4 semanas de entrenamiento, se realizó un protocolo a intensidad continua, la primera semana al 70% de la frecuencia cardíaca máxima (FCmax) y las tres semanas restantes al 80% de la FCmax, durante 2 horas al día, 6 días a la semana. Para determinar el efecto del entrenamiento, se realizaron 2 test submáximos, antes del periodo de entrenamiento y al finalizar el mismo como medio de evaluación, al 50% y al 80% VO₂max. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que los sujetos tenían un mayor volumen sanguíneo y que había una mayor oxigenación producida por el entrenamiento.

Por otro lado, McKay et al., (2009) realizaron una investigación en la que participaron 12 sujetos. El objetivo de esta investigación es determinar el efecto en la desoxigenación y reoxigenación muscular con la aplicación de 2 sistemas de entrenamiento, un entrenamiento de alta intensidad (HIT) y un entrenamiento a intensidad baja y continua (END), los cuales se realizan durante 8 sesiones. El protocolo HIT se compone de 8 a 12 series de 1 minuto a intensidad del 120% VO₂max separados entre sí por 1 minuto de recuperación y el protocolo END el cual se realizan de 90-120 minutos al 65% VO₂max. Para evaluar los cambios, utilizaron un protocolo incremental máximo para determinar el VO₂max y estimar el umbral de lactato (ULa). Los resultados obtenidos en esta investigación indican que con ambos entrenamientos se producen las mismas adaptaciones oxidativas y metabólicas, teniendo el entrenamiento HIT una duración de 180 minutos mientras que el END un tiempo total de 825 minutos.

Buchheit & Ufland (2011) analizaron el efecto de 8 semanas de un programa de entrenamiento con sprints repetidos. En esta investigación participaron 18 sujetos entrenados. Para evaluar el efecto, realizaron antes y después del programa, 3 pruebas: tiempo en una distancia de 10 km, test de velocidad aeróbica máxima (VAM) y 2 series de 15 segundos en sprint con recuperación de 15 segundos de forma pasiva para determinar la recuperación oxidativa. Los resultados obtenidos en este estudio indican que los sujetos mejoraron el tiempo en la distancia de 10 km y su VAM, tuvieron una reoxigenación mayor entre dos series de sprint de 15 segundos y aumentaron su VO₂max.

Otro estudio realizado ante el entrenamiento de alta intensidad (HIT) y con resultados similares a los de McKay et al. (2009) y Buchheit y Ufland (2011), fue el realizado por Prieur y Mucci (2013). En este estudio diseñaron un protocolo de entrenamiento HIT en carrera durante 6 semanas con 3 sesiones semanales en el que participaron 11 sujetos varones no entrenados. Para evaluar el efecto del entrenamiento se realizaba un protocolo incremental en ciclismo antes y después de la sesión de entrenamiento. Antes del estudio se realizó un test para determinar la VAM de los sujetos. El protocolo de entrenamiento consistió en 3 series de 6 repeticiones de 30 segundos al 120% VAM con un descanso de 30 segundos. Entre series se realizaba un descanso de 6 minutos. Los resultados obtenidos en esta investigación determinan que el entrenamiento HIT cambia el perfil de desoxigenación muscular durante el ejercicio incremental, lo que sugiere una mejora en la extracción de O₂ con el entrenamiento, además de no reducir la heterogeneidad espacial de desoxigenación muscular y el volumen de sangre durante el ejercicio.

Hirano et al. (2015) realizaron una investigación en ciclismo con el objetivo de examinar el efecto de la cadencia de pedaleo en ciclismo para determinar cambios en la oxigenación y cambios en la potencia requerida en el umbral de lactato (ULa). En el estudio participaron 16 sujetos que realizaron un protocolo incremental para determinar el VO₂max y la intensidad donde se localizaba el ULa. Los sujetos realizaron sesiones de 60 minutos 5 veces a la semana durante las 2 semanas de entrenamiento a intensidad de ULa a cadencias de 35, 50 y 75 rpm. Los resultados en esta investigación determinan que existe una influencia en la oxigenación periférica durante el ejercicio en función de la cadencia de pedaleo a intensidad de ULa.

Por último, describimos el estudio realizado por Neary, McKenzie y Bhambhani (2005) con el objetivo de evaluar una fase de tapering tras un programa de entrenamiento. Para ello, diseñaron un protocolo de tapering durante una semana en la que los sujetos se dividían en 3 grupos de reducción de volumen de entrenamiento (30, 50 y 80%). Para evaluar el proceso se realizó una simulación de 20 km en rodillo antes y después del programa de tapering. Los resultados de esta investigación indican que los sujetos obtuvieron una mayor Hb/MbO₂ muscular y un mayor rendimiento en el grupo del 50% de reducción del volumen de entrenamiento. El grupo con reducción del 80% mejoró, pero no de forma significativa. Mientras que, el grupo que redujo un 30% tuvo una reducción del rendimiento tanto a nivel de potencia como a nivel oxidativo muscular.

1.5.2. USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS UMBRALES VENTILATORIOS A TRAVÉS DE SU CORRELACIÓN CON EL ÁCIDO LÁCTICO Y EL ANÁLISIS DE GASES

La primera investigación realizada para analizar la correlación entre la estimación del umbral láctico y la tecnología NIRS fue publicada por Grassi, Quaresima, Marconi, Ferrari y Cerretelli

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

(1999). En este artículo, se realizó un test incremental en ciclismo a 5 ciclistas entrenados, los cuales realizaban paliers con incrementos de 30W cada 4 minutos hasta la extenuación. Los resultados concluyen que el umbral láctico detectado a través de LT (línea de base) más 2 mmol (LT+2) tiene una correlación con el descenso brusco de $\Delta[\text{O}_2\text{Hb}-\text{HHb}]$ de ($r^2=0,95$; $P<0,01$).

Lafrance (2003) descubrió que en la ventana espectral entre 2050-2400 nm se podía detectar el nivel de ácido láctico en sangre con un error de 0,65 mmol y una coeficiente de correlación de 0,978. Además, desarrollaron un modelo de mayor precisión en el que a partir de variaciones de lactato por encima de la línea de base (LT), el error obtenido era de 0,21 mmol y el coeficiente de correlación de 0,992 por lo que se determinaba que era una herramienta para la evaluación fisiológica del sujeto a nivel clínico y del entrenamiento.

En otra investigación, Wang et al. (2006) realizaron un estudio incremental en ciclismo en el que participaron 15 sujetos con el objetivo de determinar donde se encontraba una variación en la línea de base del estado estable de lactato (LT) correspondiente al umbral ventilatorio (VT) a través de las variables obtenidas de la tecnología NIRS. Los resultados obtenidos en dicha investigación indican que $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ determinó LT en 11 de 15 sujetos, mientras que ΔHHb y y TOI (índice de saturación de oxígeno de los tejidos) determinó ese hito fisiológico en el total de los sujetos. Por lo tanto, la conclusión principal de esta investigación es que ΔHHb y TOI es la mejor variable para la estimación de VT y LT.

En la misma línea que el estudio de Wang et al. (2006), Xu et al. (2011) realizó una investigación para determinar la correlación existente entre la variación de la oxihemoglobina ($\Delta\text{O}_2\text{Hb}$) y la variación de ácido láctico (BLA) en el músculo. En el estudio participaron 23 atletas seleccionados a nivel nacional en natación. Para ello, se utilizó un test incremental en ciclismo en el que se realizaron incrementos de 30W cada 3 minutos hasta la extenuación. Los resultados determinan que los puntos críticos del ácido láctico sanguíneo (LT y LT+2) que coinciden con el umbral aeróbico y el umbral anaeróbico tuvieron una alta correlación con un pequeño descenso de $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ en el umbral aeróbico y un descenso brusco de $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ en el umbral anaeróbico. Por lo tanto, se determina que $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ podría utilizarse de forma no invasiva para la estimación de estos hitos fisiológicos.

Diferentes investigaciones recientes obtienen resultados en la misma línea que los expuestos anteriormente. Bellotti, Calabria, Capelli, y Pogliaghi (2013) compararon la determinación del máximo estado estable de lactato (MLSS) mediante el análisis de ácido láctico y el análisis de desoxigenación ΔHHb en un test incremental en ciclismo donde participaron 32 sujetos varones. Los resultados determinan una alta correlación entre la detección del máximo estable en NIRS ($\text{NIRS}_{\text{MLSS}}$) y la detección por ácido láctico tanto en porcentaje de VO_2max ($r^2=0.81$) como en porcentaje de la frecuencia cardíaca máxima (FCmax) ($r^2=0.76$). En base a los resultados obtenidos, los autores

determinan que el uso de la tecnología NIRS es un método no invasivo y más barato que la determinación por medición de láctico para la detección de este hito fisiológico.

Recientemente, Fontana et al. (2015) compararon la detección el hito fisiológico RCP (punto de compensación respiratoria, asociado al VT₂) mediante el “gold standard” que es el análisis de gases y la tecnología NIRS. Este estudio se realiza en 118 adultos varones. La prueba utilizada fue un test incremental en ciclismo hasta la extenuación. Los resultados determinan que existe una alta correlación entre la desoxigenación (ΔHHb), el incremento del coeficiente respiratorio de VE/VCO_2 y el descenso brusco de la presión parcial de CO_2 (PetCO_2) de $r^2=0.86$. Por tanto, la principal conclusión de este estudio determina que este método tiene una alta correlación para la estimación del punto de compensación respiratoria.

1.5.3. USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA DETERMINAR LA INCIDENCIA DEL USO DE PRENDAS COMPRESIVAS EN LA OXIGENACIÓN MUSCULAR

Los estudios científicos que analizan la incidencia de las prendas compresivas en la mejora del metabolismo oxidativo para la mejora del rendimiento en la alta competición es muy reciente. En el año 2008, Scanlan et al. realizaron una investigación en la que participaron esta 12 ciclistas varones entrenados. El test utilizado fue un trial de 1 hora donde se hicieron dos grupos de sujetos, un grupo experimental en el que 6 sujetos llevaron prendas compresivas en las piernas y muslos y un grupo control de 6 sujetos sin prendas compresivas. Los resultados obtenidos determinan que no existen mejoras estadísticamente significativas entre ambos grupos en cuanto a potencia media (W) y oxigenación muscular (mOxy). La principal conclusión de esta investigación determina que existen beneficios fisiológicos limitados en el rendimiento por utilizar estas prendas en un trial de 1 hora.

Posteriormente, Dascombe et al. realizaron dos estudios publicados en los años 2011 y 2013. Dascombe et al. (2011) realizaron un estudio en 11 sujetos entrenados en competiciones de media distancia en carrera a pie y triatletas. La prueba utilizada fue un test hasta la extenuación al 90% VO_2max . Los atletas se distribuyeron en 3 grupos, 2 con medias compresivas de diferente presión y 1 grupo control las cuales comprimían la musculatura del tren inferior desde la creta ilíaca hasta el tobillo. El resultado de la prueba determina que el uso de estas calcetas tiene efectos fisiológicos beneficiosos ya que incrementa el retorno venoso pero no tiene efectos en la mejora del rendimiento. En el estudio de Bringard et al. (2006) obtuvieron las mismas conclusiones que en el estudio anteriormente mencionado. Después, Dascombe et al. (2013) realizaron otra investigación cuyo objetivo era probar el efecto de estas prendas compresivas en los grupos musculares del tren superior. En esta investigación participaron 7 remeros élite, 5 hombres y 2 mujeres. Los sujetos realizaron un test máximo de 4 minutos y los resultados obtenidos determinan que no existen mejoras en el rendimiento.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Por último, Sperlich et al. (2013) realizaron un estudio cuyo objetivo fue ver el efecto de diferentes niveles de compresión (0, 20 y 40 mmHg) a través de unas prendas compresivas en las piernas en una prueba de 3 minutos de descenso en esquí en posición acoplada. Los resultados determinaron que a nivel de las piernas los sujetos tuvieron una menor desoxigenación y una menor sensación psicológica de cansancio, pero a nivel global tuvieron la misma concentración de ácido láctico y la misma frecuencia cardiaca por lo que no tiene efecto en el rendimiento. El rango eficaz de compresión se determinó entre 20-40 mmHg.

1.6. APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA NIRS DURANTE EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA

Las evidencias científicas reportadas de la utilización de la tecnología NIRS durante protocolos que utilicen principalmente el componente de la fuerza son bastante escasas. Solo se han encontrado cuatro estudios que han usado esta tecnología para evaluar la cinética de oxigenación muscular en estas condiciones.

En primer lugar, Tamaki, Uchiyama, Tamura, & Nakano, (1994) monitorizó la oxigenación muscular del bíceps braquial durante un ejercicio de curl de bíceps. Realizaron 10 repeticiones sin carga y 10 repeticiones máximas (RM) con 3 segundos por repetición. Además, realizaron 3 series de 5 repeticiones con 1 minuto de descanso entre series sin especificar la carga.

No se observaron cambios durante las 10 repeticiones sin carga, aunque en las 10 RM se observó un incremento de HHb y un descenso de HbO₂, así como un descenso del flujo total al principio del ejercicio hasta recuperarse hasta los niveles basales al final de todos los valores. La monitorización durante las 3 series de 5 repeticiones fue muy parecida al ejercicio de 10RM con la principal diferencia que el flujo total de hemoglobina aumenta tras la recuperación de cada serie. Así, los autores sugieren que este tipo de ejercicios inducen una restricción en el flujo sanguíneo hacia el musculo efector produciendo una relativa falta de suministro de oxígeno y que estas 3 series de 5 repeticiones con 1 minuto de descanso aceleran este efecto denominado anoxia.

Por otro lado, con un diseño experimental más cuidadoso, Azuma, Homma, y Kagaya (2000), monitorizaron el vasto lateral y el recto femoral mediante NIRS durante el ejercicio de extensión de cuádriceps. Utilizaron intensidades del 20%, 30% y 40% del 1RM realizando 60 repeticiones por minuto hasta llegar a la fatiga (363+-68 segundos, 110+- 18 segundos y 51+- 7 segundos, respectivamente) La saturación de oxígeno, fue inferior en el vasto lateral que en el recto femoral (significativamente solo al 30% 1RM). Y fue significativamente menor al 30% y al 40% para ambos músculos cuando compararon con el 20%. El punto de fatiga en las diferentes intensidades en el recto femoral no fue estadísticamente significativo. Se sugirió que las diferencias entre estos dos músculos pueden estar relacionadas con el tipo de fibra en su composición, ya que el vasto lateral tiene una alta

composición en fibras tipo I y por lo tanto es capaz de ser más activo con menos niveles de oxígeno muscular.

Hoffman et al., (2003) realizaron una investigación en la que analizaron la oxigenación muscular en el vasto lateral durante cuatro series de sentadillas con 3 minutos de descanso entre series. Se compararon dos intensidades diferentes: baja - 15 repeticiones al 60% del 1RM (41.6 \pm 6.6 segundos) y alta - 4 repeticiones al 90% del 1 RM (21.4 \pm 3.6 segundos). Aunque los niveles de reoxigenación fueron similares en los dos grupos, hubo un retraso significativamente más largo antes de la reoxigenación en el grupo de baja intensidad. Los autores sugirieron que ese retraso más largo puede estar causado por un aumento en las concentraciones de lactato encontradas en los protocolos de baja intensidad. Adicionalmente, este aumento de la concentración de lactato pudo estimular el aumento de la respuesta hormonal que fue significativamente mayor en el grupo de baja intensidad.

Finalmente, Tanimoto e Ishii (2005), realizaron una investigación cuyo objetivo era analizar los cambios de oxigenación en el vasto lateral durante la extensión de cuádriceps. Los sujetos fueron asignado a diferentes grupos: (i) grupo de baja intensidad y baja velocidad (LS) 8RM (50% 1RM) y 3 segundos en cada repetición, (ii) grupo alta intensidad y normal velocidad (HN), 8RM (80% 1RM) y 1 segundo para cada repetición y (iii) grupo baja intensidad y velocidad normal (LN) 8 repeticiones (50% 1RM) y 1 segundo para cada repetición. El grupo LS mostro menos oxigenación que los otros dos grupos y LS y HN fueron significativamente mayores en reoxigenación respecto a LN.

Resulta evidente a partir de estos estudios, que la cinética de la oxigenación intramuscular y el volumen sanguíneo medidos por NIRS dependen de los protocolos de entrenamiento de fuerza, y pueden variar en los diferentes músculos. Aunque esta técnica ha sido utilizada extensivamente durante ejercicios dinámicos para aumentar el entendimiento de la cinética de la oxigenación muscular, durante el entrenamiento de fuerza es limitada. En este sentido, aunque existe un incremento en el interés del estudio de los mecanismos que se producen durante el entrenamiento de fuerza, muchos aspectos relacionados con este tipo de ejercicio en humanos esta poco claro (Badillo & Serna, 2002). Esto es debido a la interacción de una múltiple combinación de variables que conlleva el entrenamiento de fuerza unido al complejo acceso para investigar esta infinitud de variables de un músculo de un deportista en movimiento (Sanchez-Medina, Perez, & Gonzalez-Badillo, 2010). Es por ello, que los métodos no invasivos pueden aportar un gran desarrollo ante este problema.

La manipulación de las variables de entrenamiento influyen directamente sobre su desarrollo, y la fatiga puede ser una variable importante que debido también a su carácter multifactorial, aún los mecanismos de su formación permanecen imprecisos (Gómez-Campos, Cossio-Bolaños, Brousett Minaya y Hochmuller-Fogaca, 2010). Así Gómez-Campos et al., (2010), clasifican la fatiga desde el punto de vista funcional como fatiga central o neuronal (ocurre por el fallo del SNC en la estimulación adecuada de las motoneuronas) y fatiga periférica o muscular (relacionada con alteraciones en la superficie de la membrana celular y cambios metabólicos). También se ha sugerido que la isquemia

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

localizada puede causar una fatiga muscular por la falta de riego sanguíneo y consecuente disminución del aporte de oxígeno (hipoxia) (Legrand et al., 2005).

Por otra parte, se sugiere que los ajustes homeostáticos son insuficientes para mantener la constante en la concentración de oxígeno capilar en el tejido muscular (Chance et al., 1992). Existiendo un gran campo de actuación y conocimiento para investigaciones sobre los complejos mecanismos que se producen durante la fatiga muscular que debido a las limitaciones técnicas no han recibido el estudio adecuado (Ferrari et al., 2004). Entre otras aplicaciones, la tecnología NIRS se ha utilizado para investigar los cambios en la oxigenación del tejido muscular durante tareas motoras. Así, hay evidencia de que el método NIRS puede evaluar los diferentes mecanismos y fenómenos que aún deben ser comprendidos durante el entrenamiento de fuerza (Pereira et al., 2007).

1.7. USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS PARA LA EVALUACIÓN DE PROGRAMAS DE RECUPERACIÓN

La tecnología NIRS también ha sido utilizada para la evaluación de programas de recuperación. Entre los programas de recuperación analizados destacamos la terapia con agua fría, la tecnología vibratoria y masaje tras la actividad física.

Terapia con agua fría

Ihsan et al. (2013) realizaron una investigación en la cual su objetivo principal era ver la diferencia existente entre la oxigenación muscular y el volumen sanguíneo tras ejercicio entre realizar un baño en agua fría a 10° o no realizarlo tras realizar 2 protocolos de entrenamiento. El primero consistió en un entrenamiento al 70% VAM durante media hora y el segundo protocolo fue un protocolo de 10 series de entrenamiento intermitente a velocidad de VAM. En el estudio participaron 9 sujetos varones entrenados en carrera a pie. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que en ambos entrenamientos se encuentran unos parámetros de oxigenación muscular que no son estadísticamente significativos entre ambos grupos de entrenamiento. En cuanto a la recuperación, existen diferencias entre los grupos control y con recuperación en agua fría favorables a este último grupo después de 15 minutos de inmersión tanto en menor desoxigenación (ΔHHb) como en mayor saturación de oxígeno muscular en los tejidos (ΔTOI). La principal conclusión de este estudio determina que un enfriamiento postejercicio disminuye el intercambio sanguíneo microvascular y la actividad metabólica muscular que ayudan a la recuperación muscular local.

Posteriormente, Stanley et al. (2014) realizaron una investigación cuyo objetivo fue ver la respuesta fisiológica entre el reposo pasivo y la inmersión en agua fría a 10° tras un entrenamiento intermitente de alta intensidad. En este estudio participaron 14 ciclistas entrenados que completaron dos sesiones de entrenamiento de alta intensidad (HIT) separadas por un descanso de 30 minutos en el que realizaron la inmersión en agua fría para ver el rendimiento posterior. La principal conclusión de esta investigación indica que se produce un descenso de la contribución del mecanismo anaeróbico en

el rendimiento posterior en el grupo de agua fría con respecto al grupo control, por lo que en esfuerzos de alta intensidad dependientes del metabolismo anaeróbico se producirán pérdidas en el rendimiento.

A continuación, Minett et al. (2014) realizaron una investigación en la cual su objetivo era encontrar diferencias en la recuperación tras 1 hora y tras 24 horas de cesar la técnica de recuperación utilizada. Participaron 9 sujetos en las que se realizaron 3 grupos con diferentes métodos de recuperación tras un entrenamiento de sprints intermitentes en calor: (i) control, (ii) método de enfriamiento mixto e (iii) inmersión en agua fría a 10°C. Los resultados indican que los sujetos que utilizaron el baño en agua fría tuvieron un mejor rendimiento tras 1 hora y tras 24 horas que los sujetos de los otros 2 grupos. Además, el grupo de enfriamiento tuvo efectos positivos en incremento de la oxigenación muscular y reducción del cortisol tras 1 hora de recuperación y en un gran crecimiento de la creatin-kinasa (CK: encargada de ayudar a la producción de la fosfocreatina muscular) a las 24 horas de cesar la actividad con respecto al grupo control.

Finalmente, Roberts et al. (2015) realizaron una investigación cuyo objetivo fue realizar una comparativa entre la inmersión en agua fría a 10°C y realizar una recuperación activa para determinar su efecto en la fuerza isométrica tras un ejercicio de resistencia. En el estudio participaron 10 sujetos entrenados en deportes de resistencia. Los resultados de dicha investigación determinan que se producen una recuperación más rápida de la oxigenación muscular y de la hemoglobina con la inmersión de agua fría que con la recuperación activa en los primeros 20 minutos, aunque en ambos casos se produce una mejora de la reoxigenación y una mayor tHb tras la recuperación. En cuanto a la fuerza isométrica máxima (FIM) el grupo que utiliza la técnica de recuperación en agua fría no disminuye su FIM con respecto al test inicial mientras que el grupo con recuperación activa si.

A modo de conclusión, los aspectos más importantes que extraemos de estos 4 artículos son: (i) la recuperación con agua fría ayuda a mantener el nivel de rendimiento cuando se realiza un ejercicio posterior con más de 1 hora de recuperación, (ii) ayuda a la reoxigenación y al retorno venoso y (iii) aumentar la tHb. Por el contrario, debemos utilizar la recuperación pasiva si el rendimiento queremos obtenerlo en pruebas anaeróbicas con menos de 1 hora de recuperación, ya que produce un descenso energético a través de la vía anaeróbica.

Técnicas de recuperación vibratoria

Los estudios realizados donde han utilizado técnicas de recuperación vibratoria son escasos. Nepocatych, Balilionis y Bishop (2014) realizaron un estudio donde utilizaron esta técnica en los grupos musculares del tren superior. En esta publicación realizan 3 tipos de recuperación tras 3 series de un ejercicio de tracción hasta la fatiga: un grupo control, un grupo con vibración en el tren inferior y otro grupo con vibración en el tren superior. Para controlar la mejora realizan dos test all-out de 30 segundos en el tren superior para determinar la potencia máxima tras la fatiga previa. La principal conclusión de este estudio determina que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en cuanto a RPE, potencia máxima en el test y reoxigenación muscular.

1 Manimmanakorn et al. (2015) utilizaron esta técnica de recuperación en el tren inferior. En
2 esta investigación realizaron 6 esfuerzos all-out en cicloergómetro de 30 segundos tras los que
3 utilizaron 3 tipos de recuperación para determinar su efecto: 1. 10 minutos de ciclismo a intensidad
4 baja, 2. 10 minutos de vibración y 3. recuperación pasiva sentado. Las conclusiones de esta
5 investigación determinan que no existen diferencias significativas tanto en concentración de lactato,
6 fuerza en el tren inferior, salto CMJ y RPE. La única mejora encontrada sería en la reoxigenación en el
7 grupo que realiza vibración, pero no es estadísticamente significativa y no mejora el rendimiento.
8
9

10 Son escasos los trabajos encontrados sobre esta temática, pero a modo de resumen se puede
11 decir que esta técnica como medio de recuperación no es efectiva tanto en el tren superior como
12 inferior ni mejora el rendimiento en cualquier ejercicio tras el uso de dicha técnica.
13
14

15 *Efectos de la técnica de masaje*

16 En el año 2006, Durkin et al. realizan una investigación para determinar el efecto del masaje
17 en la mejora de la recuperación. Esta investigación es realizada en conductores que hacen una
18 simulación de conducción de 1 hora a 80 km/h. Los resultados determinan que la terapia de masaje
19 incrementa el flujo sanguíneo muscular y por tanto la oxigenación tras la sesión, pero no aumenta el
20 nivel de activación muscular medido a través de electromiografía (EMG). Por lo tanto, los efectos del
21 masaje son momentáneos y se deben a la aplicación de fuerza sobre la piel durante la terapia, por lo
22 que tras su cese y la eliminación de su resultado, no afecta al rendimiento.
23
24
25
26
27
28
29

30 Otro estudio con conclusiones similares al expuesto anteriormente es el realizado por Munk et
31 al. (2012). En esta investigación tras una sesión de entrenamiento, se realiza un protocolo de masaje en
32 los gemelos para determinar sus efectos en la recuperación. Los resultados obtenidos determinan que
33 durante el masaje, como en el estudio anterior, se produce un aumento del flujo sanguíneo que no
34 conlleva un aumento electromiográfico muscular (EMG). Además, como en el estudio anterior se
35 produce un aumento de la reoxigenación y un aumento del tHb tras la realización del masaje.
36
37
38
39
40

41 **2. CONCLUSIONES**

42 Esta tecnología, que es de reciente creación, se basa en la emisión de un haz de luz a través de
43 la piel y en función de la recepción de esta señal por el dispositivo determina la cantidad de
44 hemoglobina (oxihemoglobina y desoxihemoglobina) que el sujeto tiene en los capilares
45 intramusculares tanto en reposo como durante el ejercicio físico.
46
47
48
49

50 Los estudios analizados demuestran que la espectroscopia de infrarrojo cercano es una técnica
51 válida para la medición de la saturación de oxígeno muscular de forma no invasiva, económica y en
52 tiempo real, debido a la emisión de los datos de forma inalámbrica.
53
54
55

56 Entre sus diferentes aplicaciones encontramos la detección de la cinética oxidativa muscular
57 del ejercicio físico en deportes de resistencia, la evaluación de la aplicación de programas de
58 entrenamiento y tapering, la detección de los hitos fisiológicos (umbrales ventilatorios 1 y 2) por su
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

alta correlación con el ácido láctico y la espirometría de gases, la funcionalidad del uso de prendas compresivas en el deporte, la monitorización en el entrenamiento de fuerza y la evaluación de diferentes técnicas en los procesos de recuperación.

Por lo tanto, estos dispositivos pueden ser el futuro en el análisis del rendimiento tanto en competición como en programas de entrenamiento gracias a la monitorización en tiempo real de deportistas, eliminando el uso de otras técnicas invasivas como son la espirometría de gases y el análisis de ácido láctico.

3. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmadi, S., Sinclair, P. J., Foroughi, N., & Davis, G. M. (2008). Monitoring muscle oxygenation after eccentric exercise-induced muscle damage using near-infrared spectroscopy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(4), 743-752. <http://doi.org/10.1139/h08-048>
- Azuma, K., Homma, S., & Kagaya, A. (2000). Oxygen supply-consumption balance in the thigh muscles during exhausting knee-extension exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 5(1), 97. <http://doi.org/10.1117/1.429974>
- Badillo, J. J. G., & Serna, J. R. (2002). *Bases de la programación del entrenamiento de fuerza*. INDE.
- Bellotti, C., Calabria, E., Capelli, C., & Pogliaghi, S. (2013). Determination of Maximal Lactate Steady State in Healthy Adults: Can NIRS Help? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(6), 1208-1216. <http://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182828ab2>
- Bhambhani, Y., Malik, R., & Mookerjee, S. (2007). Cerebral oxygenation declines at exercise intensities above the respiratory compensation threshold. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 156(2), 196-202. <http://doi.org/10.1016/j.resp.2006.08.009>
- Bhambhani, Y. N. (2004). Muscle oxygenation trends during dynamic exercise measured by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Applied Physiology-Revue Canadienne De Physiologie Appliquee*, 29(4), 504-523.
- Bhambhani, Y. N. (2004). Muscle Oxygenation Trends During Dynamic Exercise Measured by Near Infrared Spectroscopy. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 29(4), 504-523. <http://doi.org/10.1139/h04-033>
- Billat, V. (2002). *FISIOLOGÍA Y METODOLOGÍA DEL ENTRENAMIENTO. De la teoría a la práctica*. Editorial Paidotribo.
- Boushel, R., Langberg, H., Olesen, J., Gonzales-Alonzo, J., Bulow, J., & Kjaer, M. (2001). Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 11(4), 213-222.
- Bringard, A., Denis, R., Belluye, N., & Perrey, S. (2006). Effects of compression tights on calf muscle oxygenation and venous pooling during quiet resting in supine and standing positions. *Journal Of Sport Medicine and Physical Fitness*, 26(4), 548.
- Buchheit, M., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2009). Effect of prior exercise on pulmonary O₂ uptake and estimated muscle capillary blood flow kinetics during moderate-intensity field running in men. *Journal of Applied Physiology*, 107(2), 460-470. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.91625.2008>

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Buchheit, M., & Ufland, P. (2011). Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *European Journal of Applied Physiology*, 111(2), 293-301. <http://doi.org/10.1007/s00421-010-1654-9>
- Cettolo, V., Ferrari, M., Biasini, V., & Quaresima, V. (2007). Vastus lateralis O2 desaturation in response to fast and short maximal contraction. - PubMed - NCBI. *Med Sci Sports Exerc.*, 39(11), 1949-1959. <http://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181453476>
- Chance, B., Dait, M. T., Zhang, C., Hamaoka, T., & Hagerman, F. (1992). Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*, 262(3), C766-C775.
- Chance, B., Eleff, S., & Leigh, J. S. (1980). Noninvasive, nondestructive approaches to cell bioenergetics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 77(12), 7430-7434.
- Cornachione, K., McLaren, J., & Daniel, P. (2014). Use of wireless NIRS monitor to track changes in muscle oxygenation for laboratory-based Nordic Skiing test protocol. *Science and Skiing VI*.
- Costes, F., Prieur, F., Feasson, L., Geysant, A., Barthelemy, J. C., & Denis, C. (2001). Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(9), 1484-1489.
- Dascombe, B. J., Hoare, T. K., Sear, J. A., Reaburn, P. R., & Scanlan, A. T. (2011). The effects of wearing undersized lower-body compression garments on endurance running performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(2), 160-173.
- Dascombe, B., Laursen, P., Nosaka, K., & Polglaze, T. (2013). No effect of upper body compression garments in elite flat-water kayakers. *European Journal of Sport Science*, 13(4), 341-349. <http://doi.org/10.1080/17461391.2011.606842>
- Demarie, S., Quaresima, V., Ferrari, M., Sardella, F., Billat, V., & Faina, M. (2001). VO2 slow component correlates with vastus lateralis de-oxygenation and blood lactate accumulation during running. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41(4), 448-455.
- Du Manoir, G. R., De Lorey, D. S., Kowalchuk, J. M., & Paterson, D. H. (2009). Kinetics of VO2 limb blood flow and regional muscle deoxygenation in young adults during moderate intensity, knee-extension exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 108(3), 607-617. <http://doi.org/10.1007/s00421-009-1263-7>
- Dupont, G., Moalla, W., Matran, R., & Berthoin, S. (2007). Effect of Short Recovery Intensities on the Performance during Two Wingate Tests: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(7), 1170-1176. <http://doi.org/10.1249/mss.0b013e31804c9976>
- Durkin, J. L., Harvey, A., Hughson, R. L., & Callaghan, J. P. (2006). The effects of lumbar massage on muscle fatigue, muscle oxygenation, low back discomfort, and driver performance during prolonged driving. *Ergonomics*, 49(1), 28-44. <http://doi.org/10.1080/00140130500356882>
- Ferrari, M., Binzoni, T., & Quaresima, V. (1997). Oxidative metabolism in muscle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 352(1354), 677-683. <http://doi.org/10.1098/rstb.1997.0049>
- Ferrari, M., Mottola, L., & Quaresima, V. (2004). Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. *Canadian journal of applied physiology*, 29(4), 463-487.
- Ferrari, M., Muthalib, M., & Quaresima, V. (2011). The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1955), 4577-4590. <http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0230>
- Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012). Review: Near infrared brain and muscle oximetry: from the

discovery to current applications. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(1), 1.
<http://doi.org/10.1255/jnirs.973>

- 1 Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012, enero 31). Near infrared brain and muscle oximetry: from the
2 discovery to current applications. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*.
3
- 4 Filligoi, G. C. (2007). Fast-Slow phase separation of Near InfraRed Spectroscopy to study
5 Oxigenation v/s sEMG Changes. En T. Jarm, P. Kramar, & A. Zupanic (Eds.), *11th*
6 *Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2007, Vols*
7 *1 and 2* (Vol. 16, pp. 124-127). Recuperado a partir de <Go to ISI>://WOS:000261088900031
8
- 9 Fontana, F. Y., Keir, D. A., Bellotti, C., De Roia, G. F., Murias, J. M., & Pogliaghi, S. (2015).
10 Determination of respiratory point compensation in healthy adults: Can non-invasive near-
11 infrared spectroscopy help? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(5), 590-595.
12 <http://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.016>
13
- 14 Gadian, D., Hoult, D., Radda, G., Seeley, P., Chance, B., & Barlow, C. (1976). Phosphorus nuclear
15 magnetic resonance studies on normoxic and ischemic cardiac tissue. *Proc. Natl Acad. Sci.*
16 *USA*, 73, 4446-4448. <http://doi.org/10.1073/pnas.73.12.4446>
17
- 18 Gayeski, T., & Honig, R. (1983). Direct Measurement of IntraCellular O2 Gradients; Role of
19 Convection and Myoglobin.pdf. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 159, 613-621.
20
- 21 Gómez-Campos, R., Cossio-Bolaños, M. A., Brousett Minaya, M., & Hochmuller-Fogaca, R. T.
22 (2010). THE MECHANISMS INVOLVED IN ACUTE FATIGUE. *Revista Internacional de*
23 *Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, 10(40), 537–555.
24
- 25 Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C., Ferrari, M., & Cerretelli, P. (1999). Blood lactate
26 accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied*
27 *Physiology*, 87(1), 348-355.
28
- 29 Guenette, J. A., Vogiatzis, I., Zakyntinos, S., Athanasopoulos, D., Koskolou, M., Golemati, S., ...
30 Boushel, R. (2008). Human respiratory muscle blood flow measured by near-infrared
31 spectroscopy and indocyanine green. *Journal of Applied Physiology*, 104(4), 1202-1210.
32 <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.01160.2007>
33
- 34 Guezennec, C., Lienhard, F., Louisy, F., Renault, G., Tusseau, M., & Portero, P. (1991). In situ NADH
35 laser fluorimetry during muscle contraction in humans.pdf. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup.*
36 *Physiol.*, 63, 36-42. <http://doi.org/10.1007/BF00760798>
37
- 38 Hamaoka, T., McCully, K. K., Quaresima, V., Yamamoto, K., & Chance, B. (2007). Near-infrared
39 spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation and oxidative metabolism in healthy
40 and diseased humans. *Journal of Biomedical Optics*, 12(6). Recuperado a partir de <Go to
41 ISI>://WOS:000252851100013
42
- 43 Hesford, C. M., Laing, S. J., Cardinale, M., & Cooper, C. E. (2012a). Asymmetry of Quadriceps
44 Muscle Oxygenation during Elite Short-Track Speed Skating: *Medicine & Science in Sports &*
45 *Exercise*, 44(3), 501-508. <http://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822f8942>
46
- 47 Hesford, C. M., Laing, S. J., Cardinale, M., & Cooper, C. E. (2012b). Asymmetry of Quadriceps
48 Muscle Oxygenation during Elite Short-Track Speed Skating: *Medicine & Science in Sports &*
49 *Exercise*, 44(3), 501-508. <http://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822f8942>
50
- 51 Hirano, M., Shindo, M., Mishima, S., Morimura, K., Higuchi, Y., Yamada, Y., ... Kiyonaga, A.
52 (2015). Effects of 2 weeks of low-intensity cycle training with different pedaling rates on the
53 work rate at lactate threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 115(5), 1005-1013.
54 <http://doi.org/10.1007/s00421-014-3081-9>
55
- 56 Hoffman, J. R., Im, J., Kang, J., Ratamess, N. A., Nioka, S., Rundell, K. W., ... Chance, B. (2005).
57 The effect of a competitive collegiate football season on power performance and muscle oxygen
58 recovery kinetics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(3), 509–513.
59
60
61
62
63
64
65

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Hoffman, J. R., Im, J., Rundell, K. W., Kang, J., Nioka, S., Speiring, B. A., ... Chance, B. (2003). Effect of Muscle Oxygenation during Resistance Exercise on Anabolic Hormone Response: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(11), 1929-1934. <http://doi.org/10.1249/01.MSS.0000093613.30362.DF>
- Ihsan, M., Watson, G., Lipski, M., & Abbiss, C. R. (2013). Influence of Postexercise Cooling on Muscle Oxygenation and Blood Volume Changes: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(5), 876-882. <http://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31827e13a2>
- Im, J., Nioka, S., Chance, B., & Rundell, K. W. (2001). Muscle oxygen desaturation is related to whole body VO₂ during cross-country ski skating. *International Journal of Sports Medicine*, 22(5), 356-360.
- Jobsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 4334(198), 1264-1267.
- Jones, B., Hamilton, D. K., & Cooper, C. E. (2015). Muscle oxygen changes following sprint interval cycling training in elite field hockey players. *PloS one*, 10(3), e0120338.
- Jones, B., Hesford, C. M., & Cooper, C. E. (2013). The Use of Portable NIRS to Measure Muscle Oxygenation and Haemodynamics During a Repeated Sprint Running Test. En S. Van Huffel, G. Naulaers, A. Caicedo, D. F. Bruley, & D. K. Harrison (Eds.), *Oxygen Transport to Tissue XXXV* (Vol. 789, pp. 185-191). New York, NY: Springer New York. Recuperado a partir de http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-7411-1_26
- Jue, T., & Masuda, K. (Eds.). (2013). *Application of Near Infrared Spectroscopy in Biomedicine*. Boston, MA: Springer US. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-6252-1>
- Kell, R. T., & Bhambhani, Y. (2006). Relationship between erector spinae static endurance and muscle oxygenation-blood volume changes in healthy and low back pain subjects. *European Journal of Applied Physiology*, 96(3), 241-248.
- Koga, S., Poole, D. C., Ferreira, L. F., Whipp, B. J., Kondo, N., Saitoh, T., ... Barstow, T. J. (2007). Spatial heterogeneity of quadriceps muscle deoxygenation kinetics during cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 103(6), 2049-2056. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00627.2007>
- Kooistra, R. D., de Ruiter, C. J., & de Haan, A. (2008). Knee angle-dependent oxygen consumption of human quadriceps muscles during maximal voluntary and electrically evoked contractions. *European Journal of Applied Physiology*, 102(2), 233-242. <http://doi.org/10.1007/s00421-007-0573-x>
- Lafrance, D. (2003). Measurement of lactate in whole human blood with near-infrared transmission spectroscopy. *Talanta*, 60(4), 635-641. [http://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00042-0](http://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00042-0)
- Layec, G., Bringard, A., Le Fur, Y., Vilmen, C., Micallef, J.-P., Perrey, S., ... Bendahan, D. (2009). Effects of a prior high-intensity knee-extension exercise on muscle recruitment and energy cost: a combined local and global investigation in humans: Exercise efficiency and prior exercise. *Experimental Physiology*, 94(6), 704-719. <http://doi.org/10.1113/expphysiol.2008.044651>
- Legrand, R., Ahmaidi, S., Moalla, W., Chocquet, D., Marles, A., Prieur, F., & Mucci, P. (2005). O₂ Arterial Desaturation in Endurance Athletes Increases Muscle Deoxygenation: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(5), 782-788. <http://doi.org/10.1249/01.MSS.0000161806.47058.40>
- López-Chicharro, J., & Fernández-Vaquero, A. (2006). *Fisiología del ejercicio / Physiology of Exercise* (3^a Edición). Madrid: Médica Panamericana. Recuperado a partir de https://books.google.es/books/about/Fisiologia_del_ejercicio_Physiology_of_Ex.html?hl=es&id

- 1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
- Maikala, R. V., & Hargens, A. R. (2010). Application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in ergonomics and exercise. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(2), 123-124. <http://doi.org/10.1016/j.ergon.2009.12.003>
- Manimmanakorn, N., Ross, J. J., Manimmanakorn, A., Lucas, S. J., & Hamlin, M. J. (2015). Effect of Whole-Body Vibration Therapy on Performance Recovery. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(3), 388-395. <http://doi.org/10.1123/ijspp.2014-0225>
- McKay, B. R., Paterson, D. H., & Kowalchuk, J. M. (2009). Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *Journal of Applied Physiology*, 107(1), 128-138. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.90828.2008>
- Minett, G. M., Duffield, R., Billaut, F., Cannon, J., Portus, M. R., & Marino, F. E. (2014). Cold-water immersion decreases cerebral oxygenation but improves recovery after intermittent-sprint exercise in the heat: Cooling for recovery in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(4), 656-666. <http://doi.org/10.1111/sms.12060>
- Munk, N., Symons, B., Shang, Y., Cheng, R., & Yu, G. (2012). Noninvasively measuring the hemodynamic effects of massage on skeletal muscle: A novel hybrid near-infrared diffuse optical instrument. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 16(1), 22-28. <http://doi.org/10.1016/j.jbmt.2011.01.018>
- Muramatsu, Y., & Kobayashi, H. (2013a). Assessment of local muscle fatigue by NIRS. En *Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on* (pp. 623–626). IEEE. Recuperado a partir de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6727728
- Muramatsu, Y., & Kobayashi, H. (2013b). Assessment of local muscle fatigue by NIRS. En *Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on* (pp. 623–626). IEEE. Recuperado a partir de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6727728
- Muthalib, M., Lee, H., Millet, G. Y., Ferrari, M., & Nosaka, K. (2010). Comparison between maximal lengthening and shortening contractions for biceps brachii muscle oxygenation and hemodynamics. *Journal of Applied Physiology*, 109(3), 710-720. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.01297.2009>
- Neary, J. P., Hall, K., & Bhambhani, Y. N. (2001). Vastus medialis muscle oxygenation trends during a simulated 20-km cycle time trial. *European Journal of Applied Physiology*, 85(5), 427-433.
- Neary, J. P., McKenzie, D. C., & Bhambhani, Y. N. (2005). Muscle oxygenation trends after tapering in trained cyclists. *Dynamic Medicine*, 4(1), 4.
- Nepocatych, S., Balilionis, G., & Bishop, P. A. (2014). Effect of Upper-and Lower-Body Vibration on Recovery, Muscle Soreness and Performance. *International Journal of Exercise Science*, 7(1), 5.
- Niwayama, M., Yamamoto, K., kohata, D., Hirai, K., Kudo, N., Hamaoka, T., ... Katsumura, T. (2002). A 200-channel imaging system of muscle oxygenation using CW near infrared spectroscopy. *EICE Trans. Inf. Syst.*, 85, 115-123.
- Oueslati, F., Boone, J., & Ahmaidi, S. (2016). Respiratory muscle endurance, oxygen saturation index in vastus lateralis and performance during heavy exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 227, 41-47. <http://doi.org/10.1016/j.resp.2016.02.008>
- Pereira, M. I., Gomes, P. S., & Bhambhani, Y. N. (2007). A brief review of the use of near infrared spectroscopy with particular interest in resistance exercise. *Sports medicine*, 37(7), 615–624.
- Philippe, M., Wegst, D., Müller, T., Raschner, C., & Burtscher, M. (2012). Climbing-specific finger flexor performance and forearm muscle oxygenation in elite male and female sport climbers. *European Journal of Applied Physiology*, 112(8), 2839-2847. <http://doi.org/10.1007/s00421->

- 1 Piantadosi, C. A. (2007). Early development of near-infrared spectroscopy at Duke University.
2 *Journal of Biomedical Optics*, 12(6), 062102. <http://doi.org/10.1117/1.2804925>
- 3 Prieur, F., & Mucci, P. (2013). Effect of high-intensity interval training on the profile of muscle
4 deoxygenation heterogeneity during incremental exercise. *European Journal of Applied*
5 *Physiology*, 113(1), 249-257. <http://doi.org/10.1007/s00421-012-2430-9>
- 6
7 Quaresima, V., Ferrari, M., Ciabattini, M., Canto, U., & Colonna, R. (1999). Oxygenation kinetics of
8 different leg muscle groups measured during a 100-m sprint run by a portable near-infrared
9 photometer. *Ital J Sport Sci*, 6(1), 20–3.
- 10
11
12 Quaresima, V., Lepanto, R., & Ferrari, M. (2003). The use of near infrared spectroscopy in sports
13 medicine. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(1), 1-13.
- 14
15 Rittweger, J., Moss, A. D., Colier, W., Stewart, C., & Degens, H. (2010). Muscle tissue oxygenation
16 and VEGF in VO₂-matched vibration and squatting exercise. *Clinical Physiology and*
17 *Functional Imaging*, 30(4), 269-278.
- 18
19
20 Roberts, L., Muthalib, M., Stanley, J., Lichtwark, G., Nosaka, K., Combes, J., & Peake, J. (2015).
21 Effects of cold water immersion and active recovery on hemodynamics and recovery of muscle
22 strength following resistance exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, integrative*
23 *and Comparative Physiology*, 309(4), 389-398.
- 24
25 Saitoh, T., Ferreira, L. F., Barstow, T. J., Poole, D. C., Ooue, A., Kondo, N., & Koga, S. (2009).
26 Effects of prior heavy exercise on heterogeneity of muscle deoxygenation kinetics during
27 subsequent heavy exercise. *AJP: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 297(3),
28 R615-R621. <http://doi.org/10.1152/ajpregu.00048.2009>
- 29
30 Sako, T., Hamaoka, T., Higuchi, H., Kurosawa, Y., & Katsumura, T. (2001). Validity of NIR
31 spectroscopy for quantitatively measuring muscle oxidative metabolic rate in exercise. *Journal*
32 *of Applied Physiology*, 90(1), 338–344.
- 33
34 Sanchez-Medina, L., Perez, C. E., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2010). Importance of the Propulsive
35 Phase in Strength Assessment. *International Journal of Sports Medicine*, 31(02), 123-129.
36 <http://doi.org/10.1055/s-0029-1242815>
- 37
38 Sandbakk, Ø., Skålvik, T. F., Spencer, M., van Beekvelt, M., Welde, B., Hegge, A. M., ... Ettema, G.
39 (2015). The physiological responses to repeated upper-body sprint exercise in highly trained
40 athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 115(6), 1381-1391.
41 <http://doi.org/10.1007/s00421-015-3128-6>
- 42
43 Scanlan, A. T., Dascombe, B. J., Reaburn, P. R., & Osborne, M. (2008). The effects of wearing lower-
44 body compression garments during endurance cycling. *Int J Sports Physiol Perform*, 3(4), 424–
45 438.
- 46
47 Scheeren, T. W. L., Schober, P., & Schwarte, L. A. (2012). Monitoring tissue oxygenation by near
48 infrared spectroscopy (NIRS): background and current applications. *Journal of Clinical*
49 *Monitoring and Computing*, 26(4), 279-287. <http://doi.org/10.1007/s10877-012-9348-y>
- 50
51 Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., Lockie, R. G., & Dascombe, B. J. (2014a). Reliability of
52 telemetric electromyography and near-infrared spectroscopy during high-intensity resistance
53 exercise. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(5), 722-730.
- 54
55 Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., Lockie, R. G., & Dascombe, B. J. (2014b). Reliability of
56 telemetric electromyography and near-infrared spectroscopy during high-intensity resistance
57 exercise. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(5), 722-730.
- 58
59 Shiga, T., Tanabe, K., Nakase, Y., Shida, T., & Chance, B. (1995). Development of a portable tissue
60
61
62
63
64
65

oximeter using near infra-red spectroscopy. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 33(4), 622-626. <http://doi.org/10.1007/BF02522525>

- 1 Shiga, T., Yamamoto, K., Tanabe, K., Nakase, Y., & Chance, B. (1997). Study of an algorithm based
2 on model experiments and diffusion theory for a portable tissue oximeter. *Journal of*
3 *Biomedical Optics*, 2(2), 154. <http://doi.org/10.1117/12.268963>
4
- 5 Sperlich, B., Born, D.-P., Swarén, M., Kilian, Y., Geesmann, B., Kohl-Bareis, M., & Holmberg, H.-C.
6 (2013). Is leg compression beneficial for alpine skiers? *BMC sports science, medicine and*
7 *rehabilitation*, 5(1), 1.
8
- 9 Stanley, J., Peake, J. M., Coombes, J. S., & Buchheit, M. (2014). Central and peripheral adjustments
10 during high-intensity exercise following cold water immersion. *European Journal of Applied*
11 *Physiology*, 114(1), 147-163. <http://doi.org/10.1007/s00421-013-2755-z>
12
- 13 Szmedra, L., Im, J., Nioka, S., Chance, B., & Rundell, K. W. (2001). Hemoglobin/myoglobin oxygen
14 desaturation during Alpine skiing: *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 232-236.
15 <http://doi.org/10.1097/00005768-200102000-00010>
16
- 17 Takafumi, S, Hiroyuki H, & Takayuki, H. (s. f.). `Validity of NIR spectroscopy for quantitatively
18 measuring muscle oxidative metabolic rate in exercise.
19
- 20 Takaishi, T., Ishida, K., Katayama, K., Yamazaki, K., Yamamoto, T., & Moritani, T. (2002). Effect of
21 cycling experience and pedal cadence on the near-infrared spectroscopy parameters: *Medicine*
22 *& Science in Sports & Exercise*, 34(12), 2062-2071. [http://doi.org/10.1097/00005768-](http://doi.org/10.1097/00005768-200212000-00030)
23 [200212000-00030](http://doi.org/10.1097/00005768-200212000-00030)
24
- 25 Tamaki, T., Uchiyama, S., Tamura, T., & Nakano, S. (1994). Changes in muscle oxygenation during
26 weight-lifting exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*,
27 68(6), 465-469. <http://doi.org/10.1007/BF00599514>
28
- 29 Tanimoto, M., & Ishii, N. (2005). Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and
30 tonic force generation on muscular function in young men. *Journal of Applied Physiology*,
31 100(4), 1150-1157. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00741.2005>
32
- 33 Thomas, R., & Stephane, P. (2007). Prefrontal cortex oxygenation and neuromuscular responses to
34 exhaustive exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 102(2), 153-163.
35 <http://doi.org/10.1007/s00421-007-0568-7>
36
- 37 Vogiatzis, I., Athanasopoulos, D., Boushel, R., Guenette, J. A., Koskolou, M., Vasilopoulou, M., ...
38 Zakynthinos, S. (2008). Contribution of respiratory muscle blood flow to exercise-induced
39 diaphragmatic fatigue in trained cyclists: Respiratory muscle blood flow and exercise-induced
40 diaphragm fatigue in athletes. *The Journal of Physiology*, 586(22), 5575-5587.
41 <http://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.162768>
42
- 43 Wahr, J. A., Tremper, K. K., Samra, S., & Delpy, D. T. (1996). Near-Infrared spectroscopy: Theory
44 and applications. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 10(3), 406-418.
45 [http://doi.org/10.1016/S1053-0770\(96\)80107-8](http://doi.org/10.1016/S1053-0770(96)80107-8)
46
- 47 Wang, L., Yoshikawa, T., Hara, T., Nakao, H., Suzuki, T., & Fujimoto, S. (2006). Which common
48 NIRS variable reflects muscle estimated lactate threshold most closely? *Applied Physiology,*
49 *Nutrition, and Metabolism*, 31(5), 612-620. <http://doi.org/10.1139/h06-069>
50
- 51 Wolf, M., Ferrari, M., & Quaresima, V. (2007). Progress of near-infrared spectroscopy and
52 topography for brain and muscle clinical applications. *Journal of Biomedical Optics*, 12(6),
53 062104. <http://doi.org/10.1117/1.2804899>
54
- 55 Xu, G., Mao, Z., Ye, Y., & Lv, K. (2011). Relationship between muscle oxygenation by NIRS and
56 blood lactate. *Journal of Physics: Conference Series*, 277, 012042. [http://doi.org/10.1088/1742-](http://doi.org/10.1088/1742-6596/277/1/012042)
57 [6596/277/1/012042](http://doi.org/10.1088/1742-6596/277/1/012042)
58
- 59 Yoshimatsu, T., Yoshida, D., Shimada, H., Komatsu, T., Harada, A., & Suzuki, T. (2013).
60
61
62
63
64
65

Relationship between near-infrared spectroscopy, and subcutaneous fat and muscle thickness measured by ultrasonography in Japanese community-dwelling elderly. *Geriatrics & Gerontology International*, 13(2), 351-357.

4. TABLAS

Tabla 1. Resumen de las características presentadas por las diferentes técnicas de espectroscopia NIR.

Parámetros	CWS	SRS	TRS	PMS
[HbO ₂], [Hb], [tHb]	Cambios en %	Valor absoluto	Valor absoluto	Valor absoluto
SO ₂	No	Si	Si	Si
Coefficiente de Absorción	No	Si	Si	Si
Coefficiente de Dispersión	No	No	Si	Si
Perfil de resolución temporal	No	No	Si	No
Longitud de trayectoria de onda	No	No	Si	Si
Frecuencia de Muestreo (Hz)	≤100 Hz	≤100 Hz	≤1	≤10
Portabilidad	Uso durante actividad/Portátil	Uso durante actividad/Portátil	Portátil	Portátil
Coste	Bajo/Medio	Bajo/Medio	Alto	Medio
Estabilización inicial	No requiere	No requiere	Requiere	No requiere
Fuente lumínica	LED/diodo laser	LED/diodo laser	Diodo laser	Diodo laser
Detector	Fotodiodo de silicona	Fotodiodo de silicona	Tubo fotomultiplicador	Fotodiodo de avalancha (APDs)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49

Tabla 2. Resumen de los diferentes dispositivos para la medición de la saturación de oxígeno muscular mediante tecnología NIRS (modificado de Ferrari et al., 2011).

Instrumento	Técnica utilizada	Año de lanzamiento	Número y tipo de fuente lumínicas, número de canales	Empresa	Página web
Astem Hb-1	CWS	2010	2 LEDs, 2	Astem, Japón	www.astem-jp.com
BSX Insight Multisport	CWS	2014	2 LEDs, 2	BSX Insight, EEUU	www.bsxinsight.com
BSX Insight Cycling	CWS	2013	2 LEDs, 2	BSX Insight, EEUU	www.bsxinsight.com
BSX Insight Running	CWS	2013	2 LEDs, 2	BSX Insight, EEUU	www.bsxinsight.com
Cer0x 3210F	CWS	2007	3 LDs, 2	Ornim, Inc., EEUU	www.ornim.com
InSpectra StO ₂	CWS	2003	4 LEDs, 4	Hutchinson, EEUU	www.htibiomesaurement.com
MOXY	CWS	2012	2 LEDs, 2	Fortiori Design, EEUU	www.moxymonitor.com
NIMO	CWS	2008	3 LDs, 2	Nirox, Italia	www.niroworld.com
NIRO-200NX	CWS	2010	3 LDs, 2	Hamamatsu, Japón	www.hamamatsu.com
Oxymon-II A	CWS	2003	2-6 LDs, 2	Artinis, Países Bajos	www.artinis.com
PortaMon	CWS	2006	2 LEDs, 1	Artinis, Países Bajos	www.artinis.com
TRS-20	TRS	2009	3 LDs, 2	Hamamatsu, Japón	www.hamamatsu.com

Nota: CWS: Espectroscopia de onda continua, TRS: Espectroscopia de resolución temporal, LD: diodo láser, LED: diodo de luz emitida.

Tabla 3. Investigaciones agrupadas por especialidad deportiva que utilizan la tecnología NIRS para evaluar el rendimiento deportivo (elaboración propia).

Deporte	Prueba utilizada	Variable utilizada	Principales resultados	Autor
Atletismo	Sprints 100 m	$\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	Diferencias de saturación de oxígeno entre ambas piernas en carrera	Quaresima et al., 1999
	9 circuitos cortos con cambios de dirección y sentido	ΔHHb , ΔtHb , ΔHbO_2 , ΔTSI	No existen diferencias significativas a nivel oxidativo entre sujetos ni entre ambas piernas de cada uno de los sujetos	Jones, Hesford y Cooper, 2013
	Test 100% VO_2max hasta la extenuación	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	La desoxigenación del vasto lateral contribuye al desarrollo del componente lento del VO_2 en carrera	Demarie et al., 2001
	Simulación contrarreloj 20 km	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	Mayor desoxigenación muscular y una reoxigenación más lenta en la contrarreloj de 20 km sobre el test incremental máximo para determinar su VO_2max .	Neary et al., 2001
Ciclismo	Trabajo al 75% VO_2max con distintas cadencias de pedaleo	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	Diferencias en oxigenación muscular en función del grado de entrenamiento de los sujetos y en función de la cadencia de pedaleo.	Takaishi et al., 2002
	2 test Wingate (15-30s) con corta recuperación	ΔHHb , ΔHbO_2	La recuperación pasiva obtuvo mayor reoxigenación y mayor potencia pico en el posterior test Wingate.	Dupont et al., 2007
	5 series SIT	$\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$, $\% \text{OD}\Delta$, ΔtHb , ΔTSI	Aumenta la reoxigenación muscular periférica y es un método efectivo de entrenamiento para atletas de élite	Jones et al., 2015
Esquí	Simulaciones de slalom y slalom gigante	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	La postura baja afecta al flujo sanguíneo, provocando alteraciones en $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$ y en BV.	Szmedra et al., 2001
	Simulación esquí en tapiz – entrenamiento interválico	$\% \text{OD}\Delta$, BV	ΔODD está relacionado con el VO_2 de nuestro organismo. No existen diferencias en el $\% \text{OD}\Delta$ entre esquiar inclinado o de pie.	Im et al., 2001
Patinaje	Simulación 500 m	ΔtHb , ΔTSI , ΔHbO_2 , BV	Decreció el volumen sanguíneo en ambas piernas igual en posición de sentado y se incrementó en la izquierda sobre la derecha en las curvas por la posición diferente de ambas piernas.	Hesford et al., 2012
Escalada	Prueba de MCV del flexor del dedo	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	En los escaladores se encontró una mayor fuerza y una mejor reoxigenación que en sujetos sanos no escaladores.	Philippe et al., 2012
Fútbol	Wingate de 30 seg.	BV, $\Delta\text{Hb}/\text{MbO}_2$	Los sujetos no aumentan su potencia pico durante la temporada pero si mejoran el tiempo de reoxigenación de forma significativa.	Hoffman et al., 2005

Nota: BV: Volumen sanguíneo; ΔHbO_2 : Cambio en la oxigenación; $\% \text{OD}\Delta$: Cambios en la desaturación de oxígeno hemoglobina/mioglobina, ΔtHb : Cambios en la hemoglobina, ΔTSI : Índice de saturación de oxígeno en el tejido en tiempo real, expresado en %; VO_2max : Consumo máximo de oxígeno; VO_2 : Consumo de oxígeno.

Tabla 4. Investigaciones revisadas en las que se utiliza la tecnología NIRS para la evaluación de programas de entrenamiento y tapering (elaboración propia)..

Autor	Sujetos	Duración/Intensidad	Test de evaluación	Resultados
Costes et al., 2001	7 sujetos universitarios 5 hombres 2 mujeres	4 semanas (120 min x 6 días/semana; 70-80% FCmax)	2 test submáximos de ciclismo al 50% y al 80% del VO ₂ max	1. Incremento del volumen sanguíneo. 2. Mayor oxigenación tras el entrenamiento.
McKay et al., 2009	12 sujetos varones sanos	8 sesiones HIT (8-12 series 1', r=1'; 120% VO ₂ max, recuperación pasiva) END (90-120 min.; 65% VO ₂ max)	Test incremental máximo para determinar VO ₂ max y estimar el umbral de lactato	1. Mejoras estadísticamente significativas en grupo HIT y END, no habiendo diferencias entre ambos. 2. Con entrenamiento HIT hubo evolución más rápida en el VO ₂ que en el grupo END.
Buchheit y Ufland, 2011	18 sujetos entrenados varones	8 semanas, 2 días/semana 1. Intervalos cortos (90-115% VAM) 2. Ejercicio de baja intensidad (40-60 min; 70-75% VAM).	1. Tiempo 10 km. 2. Test VAM 3. 2x(1x15''all-out), r=15''	1. Mejoran el tiempo en 10 km. 2. Mejoran su VAM 3. Mejor reoxigenación entre las 2 series de 15 segundos all-out.
Prieur y Mucci, 2013	11 sujetos no entrenados varones	6 semanas, 3 días/semana 3x(6x30'', 120% VAM; r=30'' pasiva)	Test incremental máximo en carrera (Test VAM).	1. Cambia el perfil de desoxigenación muscular durante el ejercicio incremental, lo que sugiere una mejora en la extracción de O ₂ . 2. No reducir la heterogeneidad espacial de desoxigenación muscular y el volumen de sangre durante el ejercicio.
Hirano et al., 2015	16 varones sanos	2 semanas, 5 días/semana (60 min; 100% ULa) con 3 cadencias de pedaleo (35, 50, 75 rpm)	Test incremental máximo para determinar VO ₂ max y estimar el umbral de lactato	1. Influencia en la oxigenación periférica en función de la cadencia de pedaleo.
Neary et al., 2005	11 sujetos varones que compiten en ciclismo	1 semana tapering 3 grupos de reducción de volumen del entrenamiento (30%, 50%, 80%).	Test de 20 km	1. Reducción del 30%: No mejora el rendimiento ni mejora a nivel oxidativo. 2. Reducción del 50%: Mejoras significativas en el rendimiento y a nivel oxidativo. 3. Reducción del 80%: Mejoras en el rendimiento y a nivel oxidativo, pero no son estadísticamente significativas.

Nota: FCmax: Frecuencia cardiaca máxima; VO₂max: Consumo máximo de oxígeno; VAM: Velocidad Aeróbica Máxima; HIT: Entrenamiento de Alta Intensidad; END: Entrenamiento de moderada/baja intensidad; O₂: Oxígeno; ULa: Umbral Láctico.

Tabla 5. Investigaciones revisadas en las que se utiliza la tecnología NIRS para la estimación de hitos fisiológicos (elaboración propia).

Autor	Sujetos	Test de Evaluación	Variables comparadas	Resultados
Grassi et al., 1999	5 ciclistas entrenados	Test incremental ciclismo 30W cada 4 minutos	$\Delta[\text{O}_2\text{Hb}-\text{HHb}]$ vs LT+2	Alta correlación entre el descenso brusco de $\Delta[\text{O}_2\text{Hb}-\text{HHb}]$ y LT+2 ($r^2=0,95$; $P<0,01$).
Lafrance, 2003	5 sujetos varones	All-out 30 segundos en una bicicleta isocinética.	ΔLA vs NIRS_{LA} en ventana espectral 2050-2400 nm	Error de 0,65 mmol y un coeficiente de correlación de 0.978.
Wang et al., 2006	15 sujetos varones	Test incremental ciclismo	LT vs $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$, ΔHHb y TOI.	- Estimación en todos los sujetos de LT mediante ΔHHb y TOI. - Estimación en 11 de los 15 sujetos de LT mediante $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$.
Xu et al., 2011	23 nadadores de nivel nacional	Test incremental ciclismo 30W cada 3 minutos	LT y LT+2 vs $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ y ΔHHb .	- Pequeño descenso de $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ en LT y descenso brusco de $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$ en LT+2. - Pequeño aumento de ΔHHb en LT y aumento brusco de ΔHHb en LT+2.
Bellotti et al., 2013	32 sujetos varones	Test incremental ciclismo	MLSS vs ΔHHb	- Estimación % VO_2max entre MLSS y ΔHHb con correlación de $r^2=0.81$. - Estimación %FCmax entre MLSS y ΔHHb con correlación de $r^2=0.76$.
Fontana et al., 2015	118 adultos varones	Test incremental ciclismo	RCP (VT2) vs ΔHHb	Correlación entre ambas variables de $r^2=0.86$.

Nota: FCmax: Frecuencia cardiaca máxima; VO_2max : Consumo máximo de oxígeno; $\Delta[\text{O}_2\text{Hb}-\text{HHb}]$: Relación entre la oxihemoglobina y la desoxihemoglobina; LT: Ácido láctico en la línea de base; LT+2: LT + 2 mmol; NIRS_{LA} : Detección no invasiva de láctico a través de NIRS en la ventana espectral 2050-2400 nm.; $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$: Incremento oxihemoglobina; ΔHHb : Incremento de la desoxihemoglobina; TOI: Saturación de oxígeno del tejido; MLSS: Máximo estado estable; RCP: Punto de compensación respiratoria (asociado a VT2: umbral ventilatorio 2).

Tabla 6. Investigaciones revisadas en cuanto al uso de la tecnología NIRS para la evaluación de programas de recuperación.

Técnica de	Autor	Programa de la	Test de Recuperación	Resultados
------------	-------	----------------	----------------------	------------

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49

Recuperación	Investigación		
Terapia con agua fría	Ihsan et al., 2013	1. 70% VAM durante 30 minutos 2. 10 series HIT a 100% VAM	1. Baño en agua a 10° durante 15 minutos 2. Recuperación pasiva
	Stanley et al., 2014	2 sesiones de entrenamiento HIT separadas por 30 minutos con recuperación	1. Baño en agua a 10° durante 15 minutos 2. Recuperación pasiva
	Minett et al., 2014	Entrenamiento de sprints repetidos (SIT)	1. Recuperación pasiva 2. Recuperación activa y estiramientos 3. Inmersión en agua fría a 10°.
	Roberts et al., 2015	Entrenamiento de resistencia aeróbica	1. Recuperación activa 2. Inmersión en agua fría a 10°.
	Nepocatyeh et al., 2014	3 series de remo hasta la fatiga	1. Recuperación pasiva 2. Vibración tren inferior 3. Vibración tren superior
Terapia Vibratoria	Manimmakom et al., 2015	6 series all-out de 30 segundos	1. Recuperación activa 2. 10 minutos de vibración 3. Recuperación pasiva
	Durkin et al., 2006	Simulación de conducción 1 hora a 80 km/h	1. Recuperación pasiva 2. Masaje
Masaje	Munk et al., 2012	Entrenamiento a intensidad moderada en carrera	1. Recuperación pasiva 2. Masaje en los gemelos

1. Tras 15 minutos de agua fría menor desoxigenación (ΔHHb) y mayor saturación de oxígeno muscular en los tejidos (ΔTOI).
2. La terapia de agua fría disminuye el intercambio sanguíneo microvascular y la actividad metabólica muscular ayudando a la recuperación muscular local.

1. Menor rendimiento del grupo de agua fría en el posterior HIT por descenso de contribución del mecanismo anaeróbico.
2. Si se realiza esta técnica antes de competiciones con alto componente anaeróbico se produce un descenso del rendimiento.

1. Tras 1 hora y tras 24 horas, el grupo de agua fría tuvo un mayor mantenimiento de la fuerza que el resto de grupos.
2. El grupo de agua fría tuvo mayor oxigenación muscular, reducción del cortisol (tras 1 hora) y un gran crecimiento de la creatin-kinasa (CK) hasta 24 horas de cesar la actividad.

1. Existe una más rápida y mejor reoxigenación ($\Delta\text{O}_2\text{Hb}$) y un aumento de la cantidad total de hemoglobina (tHb) en el grupo de agua fría con respecto al de recuperación activa.
2. El rendimiento de agua fría, tras 1 hora de recuperación, es mayor que el de recuperación activa en cuanto a FIM.

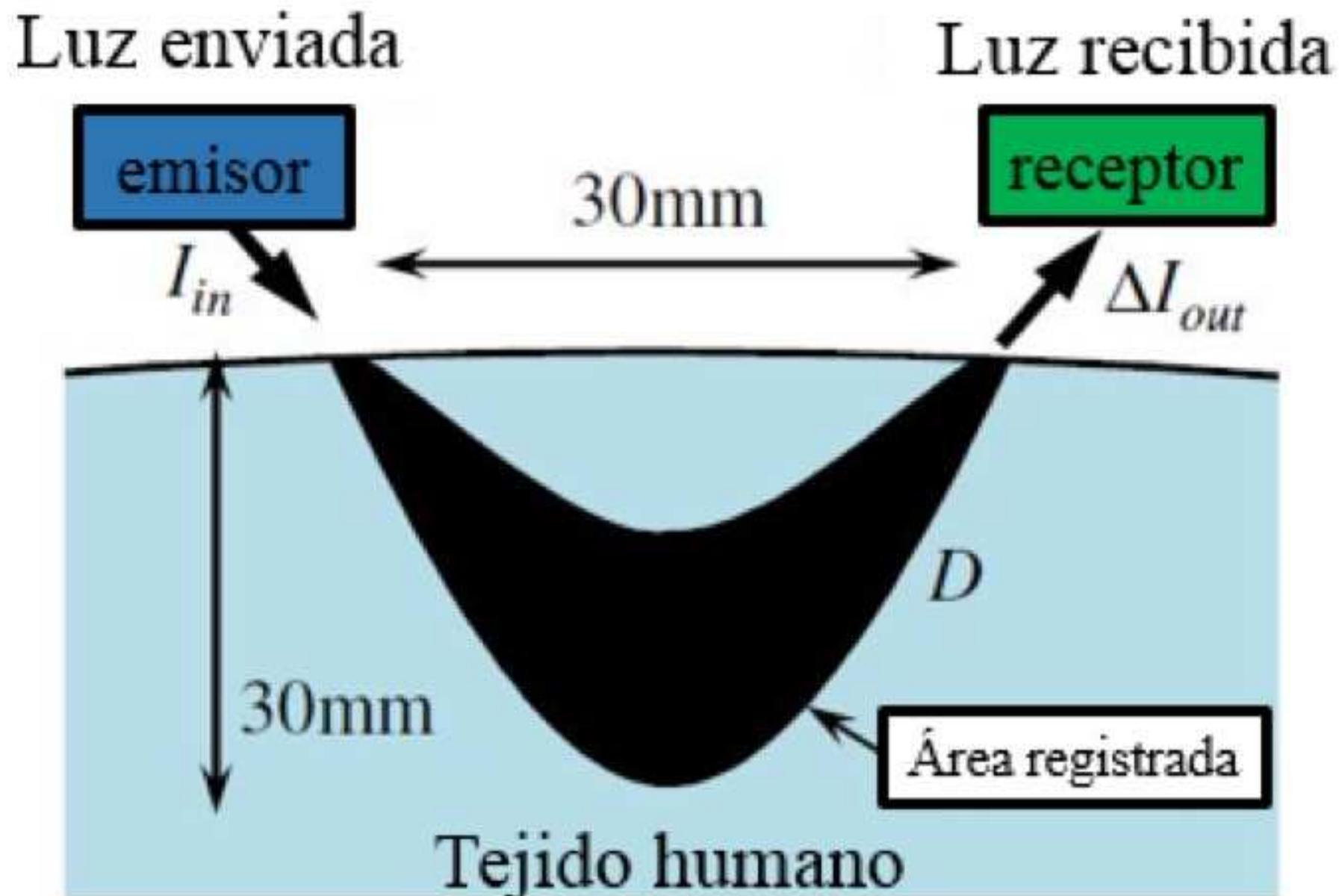
No existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en cuanto a RPE, potencia máxima tras test 30 segundos all-out ni en la reoxigenación muscular (ΔTOI).

1. No existen diferencias entre la concentración de lactato, fuerza en el tren inferior, salto CMJ y RPE entre los grupos.
2. Mejora en la reoxigenación (ΔTOI) en el grupo de vibración, no estadísticamente significativa.

1. El masaje incrementa el flujo sanguíneo muscular y por ende la oxigenación ($\Delta\text{O}_2\text{Hb}$).
2. Esta terapia no aumenta la activación muscular por lo que no afecta al rendimiento.

1. Aumento del flujo sanguíneo que por ende aumenta la oxigenación ($\Delta\text{O}_2\text{Hb}$) y la cantidad total de hemoglobina (tHb).
2. Esta terapia no aumenta la activación muscular por lo que no afecta al rendimiento.

Nota: VAM: Velocidad aeróbica máxima; ΔHHb : Incremento de la desoxihemoglobina; $\Delta\text{O}_2\text{Hb}$: Incremento de la oxihemoglobina; tHb: cantidad total de hemoglobina; TOI: Saturación de oxígeno del tejido; HIT: Entrenamiento de alta intensidad; CMJ: Salto con contramovimiento; RPE: Percepción subjetiva del esfuerzo.



$$-\text{Log}\left(\frac{I_{out}}{I_{in}}\right) = \varepsilon \times C \times D$$

$$- \text{Log} \left(\frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} \right) = \epsilon \times \Delta C \times D + \Delta S$$