



TEMAS DE ACTUALIZACIÓN

Artículo bilingüe español / inglés

Rev Esp Podol. 2024;xx(x):xx-xx

DOI: <http://dx.doi.org/10.20986/revesppod.2024.1715/2024>

Adaptación del paradigma biomecánico de Mueller y Maluf a la fisiología del esfuerzo en la lesión por sobrecarga

Adaptation of Mueller and Maluf's biomechanical paradigm to the physiology of stress in the overload lesion

Fernando Pifarré San Agustín¹, Valldeflors Pifarré Prats², Xavier Ortas Deunosajut³, Carles Escalona Marfil³ y Óscar Hernández Gervilla³

¹Departamento de Presidència. Generalitat de Catalunya Centro de Medicina Deportiva. Lleida, España. ²Servicio de Cirugía. Hospital Universitario Arnau de Vilanova. Lleida, España. ³Departamento de Podología. Universitat de Vic-Universitat Central de Catalunya. Manresa, Barcelona, España

Palabras clave:

Lesión por sobrecarga, consumo de oxígeno, paradigma biomecánico, umbral aeróbico, fisiología deportiva, músculo.

Resumen

Los paradigmas biomecánicos son instrumentos teórico prácticos que nos ayudan a interpretar, diagnosticar y tratar algunas alteraciones del aparato locomotor, especialmente de las extremidades inferiores. Para algunos son teorías científicas, ya que describen una metodología de trabajo, establecen unas leyes o principios teóricos, utilizan un instrumental de medición y técnicas necesarias para hacer que las leyes del paradigma se refieran al mundo real, y nos aportan unos principios metafísicos muy generales que guían nuestro trabajo dentro del paradigma. El presente trabajo pretende correlacionar el mundo de la fisiología del ejercicio con diferentes paradigmas biomecánicos que explican las lesiones por sobre esfuerzo, especialmente en el tejido muscular. Se repasan los parámetros fisiológicos de potencia aeróbica, umbral aeróbico y anaeróbico y porcentaje de aprovechamiento de oxígeno y cómo estos valores pueden estar relacionados con diferentes lesiones por sobre esfuerzo en los miembros inferiores explicadas según el modelo de Mueller y Maluf (teoría de estrés físico). Finalmente, se plantea un modo de rehabilitación concreto basado en la recuperación funcional, siguiendo los principios del modelo de estrés físico, que puede ser guiado o dirigido por todos los valores fisiológicos explicados.

Keywords:

Overload injury, oxygen consumption, biomechanical paradigm, aerobic threshold, sport physiology, muscle.

Abstract

Biomechanical paradigms are theoretical and practical instruments that help us interpret, diagnose, and treat certain disorders of the musculoskeletal system, especially of the lower limbs. For some, they are scientific theories because they describe a working methodology, establish certain laws or theoretical principles, utilise measuring instruments and necessary techniques to make the paradigm's laws applicable to the real world, and provide very general metaphysical principles that guide our work within the paradigm. The present paper is doing a correlation between physiology of sports medicine and different biomechanical paradigms that explain overuse injuries. The paper reviews physiological parameters such as aerobic potency, aerobic threshold, anaerobic threshold and percentage of oxygen exploitation and how this measurements can be related with different overuse injuries in the lower limbs explained under the view of the Mueller and Maluf (physical stress theory). Finally, a rehabilitation protocol is outlined based in the functional recovery of patients with overuse injuries following the principles of physical stress paradigm that can be monitored by the physiology measurements explained in the paper.

Recibido: 01-11-2024

Aceptado: 18-11-2024



0210-1238 © Los autores. 2024.
Editorial: INSPIRA NETWORK GROUP S.L.
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC Reconocimiento 4.0 Internacional
(www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Correspondencia:

Fernando Pifarré San Agustín
fpifarre@gmail.com

Introducción

Cuando realizamos actividad física se ponen en marcha no solo estructuras musculoesqueléticas, en las que además de huesos y músculos intervienen otras estructuras (tendones, ligamentos, cápsula articular, meniscos...), sino también se ponen en marcha unas reacciones bioquímicas, ya sean en forma de metabolismo aeróbico y anaeróbico. Estas reacciones se estudian en los laboratorios de fisiología del esfuerzo por los médicos especialistas en medicina deportiva. Estos laboratorios cada vez se utilizan más en clínica respiratoria, cardiológica, valoración de fatigas crónicas, además de en el mundo deportivo. Esto es porque del estudio de las vías de producción de ATP sabemos de forma directa cómo está respondiendo nuestro organismo a las diferentes demandas de energía que le solicitamos.

Las reacciones bioquímicas se producen en la célula muscular, ya sea en el citoplasma (metabolismo anaeróbico) o en la mitocondria (metabolismo aeróbico). Una de las estructuras más comúnmente sujetas a lesión en el mundo deportivo es el músculo, por lo que entendemos que podría ser interesante conocer su metabolismo a la hora de relacionarlo con la lesión por sobrecarga que comúnmente vemos en la clínica diaria cuando acontece en las extremidades inferiores y en el pie específicamente. Un ejemplo de esto es la referencia que hace Kevin A. Kirby al trabajo de Cavanagh y Whilliam respecto al consumo de oxígeno y su relación con la variación de la longitud de la zancada durante la carrera de distancia¹. Se trata de un trabajo del año 1982, realizado con un analizador de gases primitivo (saco de Douglas) con un solo módulo de O₂ en comparación a los que tenemos en la actualidad, que disponen también de módulo de CO₂, pero que en su momento introdujo la importancia que tiene la producción de ATP en el músculo esquelético.

El presente trabajo trata de relacionar el mundo de la fisiología del esfuerzo y del deporte con las lesiones musculares por estrés en el miembro inferior, y más concretamente en el conjunto pierna-tobillo-pie. En este trabajo se desarrollarán conceptos de fisiología del ejercicio que pueden ser útiles en el mundo podológico y se intentarán correlacionar con el paradigma de estrés físico propuesto por Mueller y Malu², que ofrece una perspectiva amplia del efecto del estrés físico en los diferentes tejidos del aparato locomotor y de las lesiones por sobrecarga.

Diferencias entre tres conceptos que se confunden

El cuerpo humano se puede encontrar en dos situaciones: en reposo o en actividad³. En reposo se utiliza el gasto energético mínimo denominado metabolismo basal, que se expresa en MET (equivalente metabólico). Cuando está en actividad, esta se puede clasificar en tres grupos:

1. Actividad física (AF), que es cualquier movimiento del cuerpo producido por la musculatura esquelética que suponga un gasto de energía por encima del metabolismo basal. Así, un hecho cotidiano de la vida diaria, como quitar el polvo de casa o planchar, se considera actividad física.
2. El ejercicio físico es una actividad física planificada, estructurada y repetitiva realizada con una meta que suele ser mejorar o mantener la condición física de la persona. Así, acudir a un

gimnasio para mantenerse en forma o salir a correr sería un tipo de ejercicio físico.

3. El deporte es un tipo de actividad física ejercida, ya sea en forma de juego o competición, cuya práctica supone además de entrenamiento unas normas y unas reglas de juego. Así, jugar cualquier liga o torneo o prepararse una competición se considera deporte.

Los dos primeros conceptos guardan mucha relación con la salud. El tercero a veces puede comportar lesiones por sobrecarga (LS).

Conceptos de fisiología del ejercicio

El sistema musculoesquelético obtiene la energía (ATP) mediante los sistemas anaeróbico y aeróbico. Las vías anaeróbicas producen una energía rápida, pero de corta duración. Hay dos procedimientos, el sistema aláctico que tiene como base energética a las reservas de ATP y la fosfocreatina y el sistema anaeróbico láctico merced a la glucólisis anaeróbica que se produce en el citoplasma celular.

Por su parte, las vías aeróbicas nos producen una buena cantidad de energía y de más larga duración. Consiste en la oxidación de los hidratos de carbono, lípidos y proteínas cuyas moléculas se van degradando hasta unirse al acetil coenzima A y entrar en la mitocondria, donde se desarrolla todo el proceso de la respiración celular en presencia del oxígeno. El músculo esquelético funciona como un coche de carreras, siendo muy importante saber cuánto combustible gastamos y cuándo tenemos que "entrar a boxes para repostar". Esto lo marcan unos parámetros fisiológicos, como son la potencia aeróbica máxima (PAM), el umbral aeróbico (Vt1), el umbral anaeróbico (Vt2), el porcentaje de aprovechamiento de O₂ (%O₂) en la fase de transición aeróbica-anaeróbica y la eficiencia mecánica (EM). Actualmente estos parámetros se valoran de forma muy exacta mediante las pruebas de esfuerzo directas⁴.

Estos conceptos fisiológicos normalmente no se estudian en el grado de podología. La PAM es la máxima cantidad de O₂ que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo. El Vt1 se define como la intensidad de ejercicio donde empieza a acumularse el lactato en sangre y donde se produce un primer aumento súbito de los parámetros ventilatorios (aumenta el consumo de oxígeno y aumenta la producción de CO₂) hasta un punto determinado. Wasserman definió Vt2 como la intensidad de ejercicio o de trabajo físico (una vez pasada Vt1) por encima del cual comienza a aumentar de forma brusca la concentración de lactato en sangre, a la vez que la ventilación se intensifica también de una manera desproporcionada respecto al O₂⁵. La fase entre ambos umbrales Vt1 y Vt2 se denomina fase de transición aeróbico-anaeróbica o "Isocapnic buffering", dado que la relación entre la producción de CO₂ y la ventilación se mantiene estable.

La EM es la relación entre la energía producida y su transferencia al trabajo mecánico generado (cantidad de O₂ necesario para incrementar 1 km/h en el tapiz rodante o 1 watio en un cicloergómetro). En ausencia de patología tiene que estar por debajo de 10 ml de O₂/minuto en las pruebas realizadas en cicloergómetro y de 200 ml de O₂/minuto en las pruebas realizadas en el tapiz como hemos publicado en nuestros estudios⁴. Se tiene que entrenar en la última fase del programa de entrenamiento (3 semanas antes de la competición).

El último concepto fisiológico a tener en cuenta es $\%O_2$ en la fase de transición aeróbica-anaeróbica considerándose bueno a partir de un 3.2 %, tal como indica nuestra publicación⁴. Pero este factor ha de ir unido al tiempo de mantenimiento de la fase de transición.

Cuando se realiza una prueba de esfuerzo con análisis de gases (PEAG) se observa que el VO_2 (el consumo de oxígeno) aumenta de forma progresiva hasta que llega a una fase de meseta en la que se alcanza el máximo. Para considerar que una PEAG es máxima, es necesario cumplir cuatro premisas, que son: que la frecuencia cardíaca máxima supere el 90 % de su frecuencia cardíaca máxima teórica; que el cociente respiratorio (RER) esté por encima del 1.1; que se establezca el VO_{2max} al final de la prueba, y alcanzar una máxima fatiga volitiva o evidente⁶. El RER es la relación del intercambio gaseoso entre VCO_2/VO_2 y si es > 1 quiere decir que la ventilación VCO_2 es mayor que la VO_2 y esto ocurre cuando estamos en una franca anaerobiosis. En esta fase de meseta, por mucho que aumente la intensidad del ejercicio no va a aumentar VO_2 , ya que ha alcanzado el máximo y esto se conoce como VO_{2max} (consumo máximo de oxígeno). Sabemos que el VO_{2max} viene determinado genéticamente en un 80 %, por lo que es poco entrenable.

En los años 80 se le daba mucha importancia al VO_{2max} . Posteriormente se dio mucha importancia al $Vt1$ y especialmente al $Vt2$, porque este último es muy entrenable. Realizar la actividad física entre ambos umbrales, y especialmente sobrepasar un poco $Vt1$, es la mejor manera de aprovechar los beneficios de esta para la salud. Se tiene que vigilar el hecho de realizar ejercicio físico por encima de $Vt2$, ya que se ha especulado que en esta zona pueden acontecer la mayoría de las lesiones por sobreesfuerzo⁷. El $Vt2$ se puede conocer por diversos métodos y todos más o menos son coincidentes. Lo podemos expresar en pulsaciones por minuto (ppm), velocidad en km/h o en vatios. Existen diferentes métodos que nos permiten conocer este valor: el método de la *Vslope*, cuando se produce un aumento desproporcionado de la ventilación total, el método de los equivalentes ventilatorios de O_2 y CO_2 , el método del $\%O_2$, por las presiones entidades de oxígeno y carbónico, el método de la deflexión de la frecuencia cardíaca (el más inexacto) y la elevación importante del lactato en sangre (> 4 mmol)⁵ (Figura 1).

Las franjas de entrenamiento

La PEAG la realiza el médico del deporte de forma preceptiva antes de empezar la pretemporada. Al inicio de la temporada el deportista empieza su preparación y puesta a punto mediante entrenamiento progresivo, empezando con un trabajo aeróbico extensivo. Mediante la prueba de esfuerzo conocemos de forma exacta los umbrales aeróbicos y anaeróbicos y su VO_{2max} , por lo que podremos determinar sus franjas de entrenamiento y sus porcentajes VO_2 . Estos parámetros varían durante la temporada hasta alcanzar la forma física más óptima.

Estas franjas de entrenamiento son el entrenamiento regenerativo, el entrenamiento aeróbico extensivo e intensivo, el entrenamiento anaeróbico extensivo (tolerancia al lactato I) e intensivo (tolerancia al lactato II). Hoy en día existen pulsómetros que mediante algoritmos indirectos calculan estas franjas y lo definen con el concepto de zona⁸. Estos métodos son totalmente inexactos, por lo que es muy fácil en caso de seguirlos sin ningún control científico, tener durante la temporada sobrecargas de todo tipo (Tabla I).

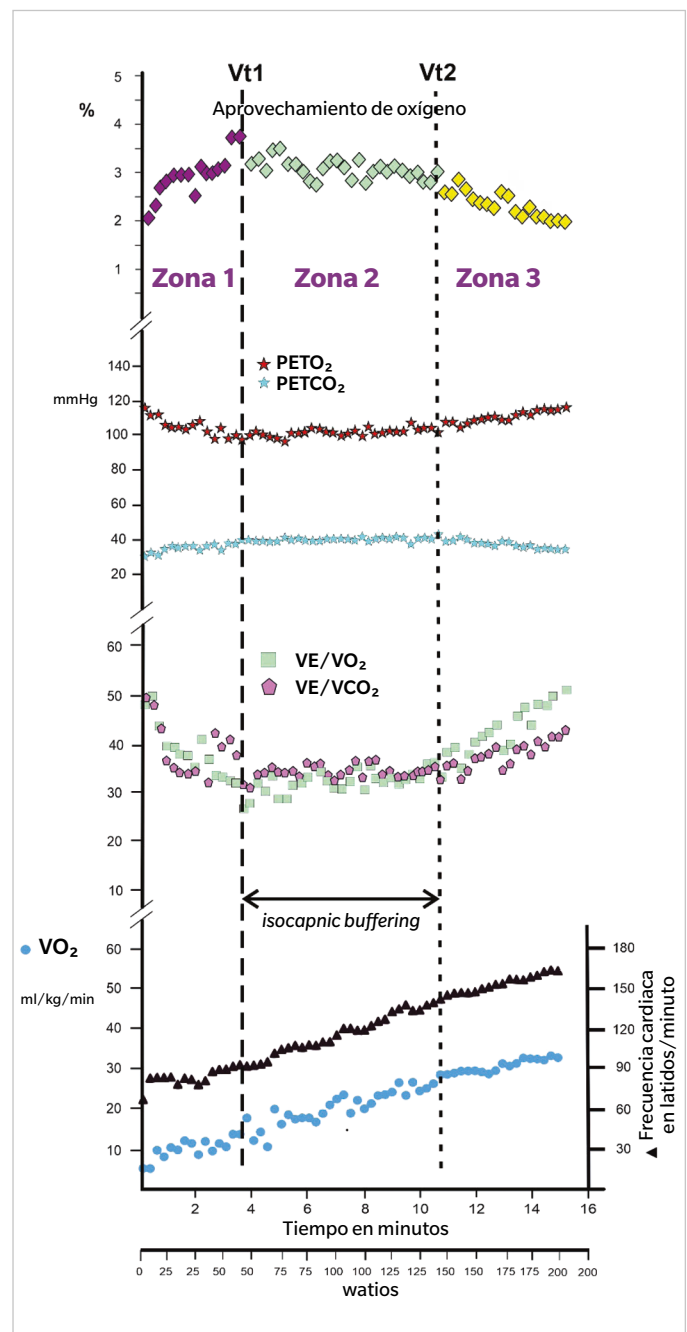


Figura 1. Figura de elaboración propia publicada en Apunts Sports Medicine 57 (2022). Se representa el VO_2 máx, equivalentes ventilatorios del O_2 (VE/VO_2) y del CO_2 (VE/VCO_2), presiones entidades del O_2 ($PETO_2$), y presiones endotidales del CO_2 ($PETCO_2$) y $\%$ de aprovechamiento del oxígeno en las fases $Vt1$ (umbral aeróbico), $Vt2$ (umbral anaeróbico) y en la zona de *isocapnic buffering*.

Cálculo de $Vt2$

Como ya se ha explicado, a medida que va avanzando la prueba de esfuerzo o una actividad física progresiva, también va aumentando el VO_2 hasta que llega un momento en el que aumenta la ventilación y se entra en la fase de *isocapnic buffering*. En este primer

Tabla I. Franjas de entrenamiento definidas a partir de Vt1 y Vt2.

	Entrenamiento de umbral anaeróbico	Entrenamiento aeróbico intenso	Entrenamiento aeróbico extensivo	Entrenamiento aeróbico extensivo	Entrenamiento regenerativo: menos de:
% Intensidad	75.74	75.74	66.34	66.34	35.75
FC Trabajo	132	132	121	121	84
VO ml/min/kg	22.11	23.02	20.67	20.67	11.14
Mets	6.32	6.58	5.91	5.91	3.18
Vatios	108.90	108.90	91.68	91.68	36.44
Velocidad km/h	8.25	8.40	8.01	8.01	6.42
	Tolerancia al lactato I		Tolerancia al lactato II		
% Intensidad	75.74	82.74	82.74	100 %	
FC Trabajo	132	141	141	159	
VO ml/min/kg	22.11	25.79	25.79	30.55	
Mets	6.32	7.37	7.37	8.73	
Vatios	108.90	121.72	121.72	123.22	
Velocidad km/h	8.25	8.86	8.86	9.66	

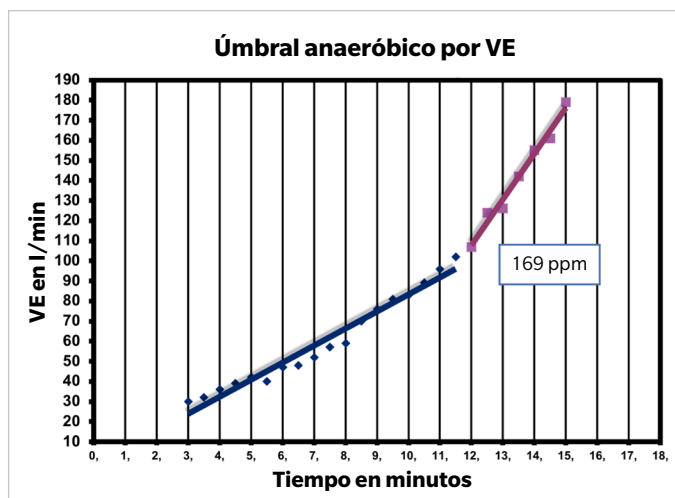


Figura 2. Gráfica para conocer el umbral anaeróbico del método ventilatorio.

aumento de la ventilación, tenemos el Vt1 (umbral aeróbico) que coincide con una concentración en sangre de lactato de 2 milimoles/l. Si sigue aumentando la intensidad de esfuerzo, se producirá un aumento súbito de la ventilación que se corresponde con una concentración de ácido láctico de 4 milimoles/l y llegamos al Vt2 (umbral anaeróbico). En este momento finaliza la fase de *isocapning buffering*, y entramos en una franca anaerobiosis llegando un momento en el que se consigue el VO_{2max} .

Este Vt2 se puede determinar de diferentes formas. Una es mediante la ventilación total (VE). Como vemos en la Figura 2, la VE sigue una función lineal con su correspondiente recta de regresión. En esta gráfica, en el eje de la x (abscisas) tenemos el tiempo en minu-

tos y en el eje de la y (ordenadas) la ventilación total en litros/minuto. Llega un momento en el que hay un punto de cruce de las dos rectas de regresión. Este punto es el Vt2. En el ejemplo que utilizamos este punto se produce en un VE de 95.78 litros que se corresponde al minuto 11 y 29 segundos en que va a 169 ppm.

Otro método es el de los equivalentes ventilatorios del O_2 y del CO_2 . El equivalente de O_2 es la relación entre VE/VO_2 y el del CO_2 . Como vemos en la Figura 3, si representamos todos los valores del analizador de gases, vemos que el comportamiento del VE/VCO_2 en un inicio baja (se corresponde al Vt1), luego se mantiene para al final subir (se corresponde al Vt2). El comportamiento del VE/VO_2 en un inicio baja mucho (se corresponde al Vt1), luego se mantiene, para al final subir bruscamente (se corresponde al Vt2).

También se puede valorar el Vt1 y el Vt2 mediante la concentración del lactato en sangre, pero en este caso no es una función lineal sino exponencial.

Porcentaje de aprovechamiento de O_2 (% O_2)

Los nuevos conceptos en fisiología del esfuerzo se centran cada vez más en conocer el % O_2 ⁹. En la representación de sus valores, también vemos de forma diferente dos puntos que se corresponderían al Vt1 y al Vt2 (Figura 4). Después de más de 3000 PEAG de todos los tipos (alto rendimiento, sedentarios, pacientes con patología cardiovascular, pacientes afectados de fatiga crónica y carcinoma de pulmón) hemos determinado que un buen % O_2 en la fase de transición aeróbica-anaeróbica es a partir de 3.2 %⁴. Llama mucho la atención que si la concentración de oxígeno en el ambiente es de aproximadamente 20.95 % y el resto básicamente es el nitrógeno (78 %), solo aprovechamos un 3.2 % del oxígeno. Por esto, este porcentaje tiene un valor muy indicativo de la función mitocondrial de la célula muscular, y por ende para que el músculo funcione bien desde el punto de vista metabólico. Lo primero que ocurrirá en caso de lesión muscular

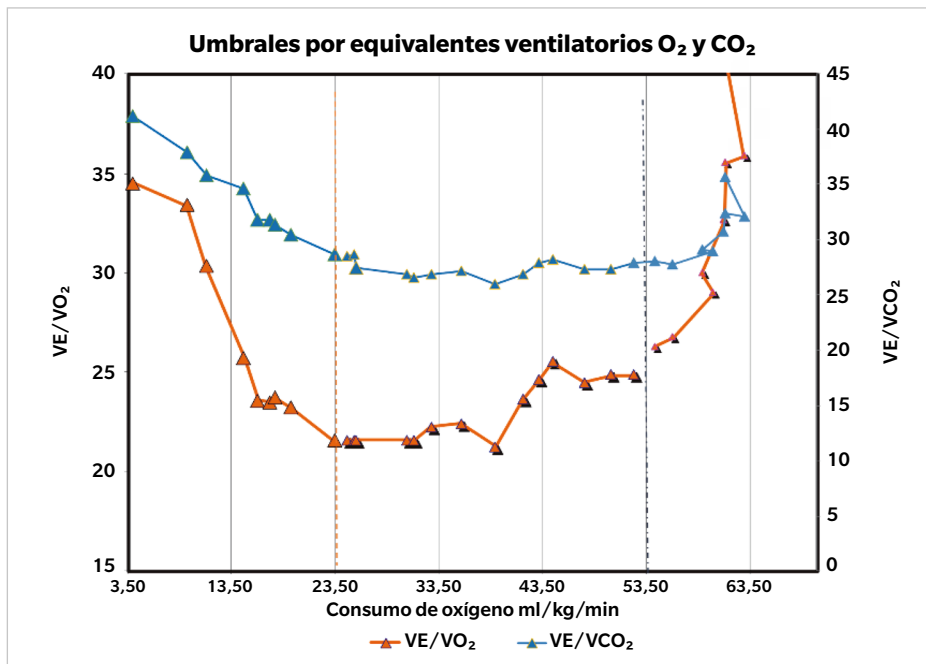


Figura 3. Gráfica para conocer los umbrales por el método de los equivalentes.

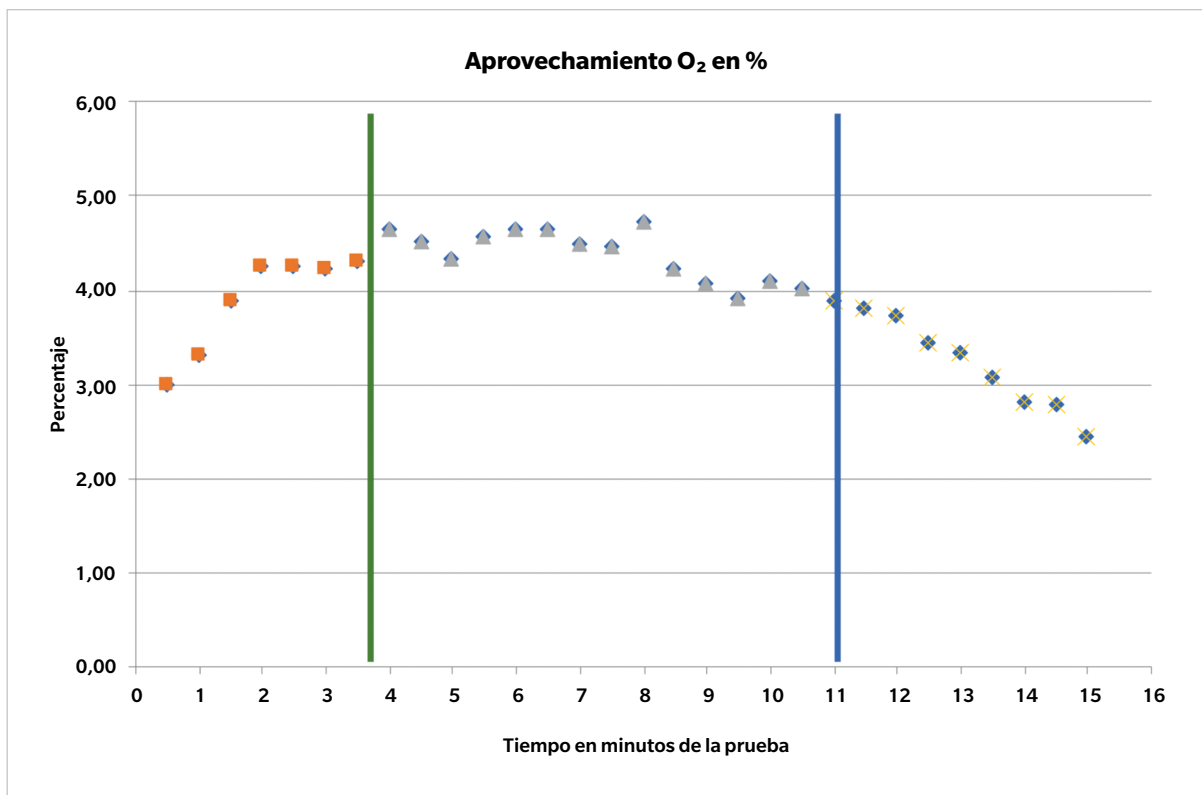


Figura 4. Aprovechamiento de O₂ en %.

de tipo físico (rotura, sobrecarga...) es un deterioro metabólico de este por el solo hecho de tener que hacer reposo en esta zona. Una vez realizado el reposo de esta zona, se iniciará la fisioterapia para

luego continuar la readaptación funcional. Para una buena readaptación funcional es necesario %O₂ sea como mínimo 3.2 %. Para llegar a este 3.2 %, será necesario en el proceso de readaptación funcional

primero realizar entrenamiento aerobio. Sería catastrófico iniciar la readaptación funcional con entrenamiento anaeróbico. Junto con esta variable se ha tener en consideración el tiempo de duración de esta fase y si se multiplican ambos factores (% y tiempo), da como resultado un valor que cuanto más elevado sea mejor nivel de %O₂ tiene la persona. Hoy en día se puede diagnosticar de forma numérica la fatiga crónica¹⁰ así como el pronóstico de un carcinoma de pulmón mediante esta determinación. Se decide el tratamiento del carcinoma de pulmón por un tratamiento quirúrgico o únicamente quimioterapia (posiblemente con peor pronóstico) en función de si tiene un buen aprovechamiento de oxígeno. También mediante el %O₂ se decide quién es un buen candidato para un trasplante de pulmón independientemente de los estudios de compatibilidad.

El otro parámetro novedoso viene de calcular la eficiencia mecánica a partir de la correlación entre vatios o velocidad y los datos de la PAM o VO_{2max}. Este parámetro tiene importancia en la programación del entrenamiento, ya que se tiene que entrenar en la última fase de entrenamiento pre-competitivo o competitivo.

Como se observa, la fisiología del ejercicio va mucho más allá de su aplicación en el rendimiento del deportista de élite, teniendo aplicación actual en patología cardíaca, patología respiratoria, diagnóstico de fatiga crónica, diagnóstico de COVID persistente, trasplante pulmón y decidir el tratamiento de carcinoma de pulmón.

Conceptos de lesión por sobrecarga y paradigma de estrés físico

Existen varios paradigmas biomecánicos que nos explican la patología por sobrecarga de las extremidades inferiores (EEII)¹¹. Una base física teórica en varios de estos paradigmas es la ley que estudia el comportamiento elástico de los materiales. Esta idea común se puede ejemplificar por medio de la ley de Hooke (1635-1703), o del muelle, donde se pone en evidencia qué ocurre cuando se aplica una fuerza externa a un material elástico al que le va producir una deformación¹¹.

La aplicación de esta ley elemental de la física en los diferentes tejidos del sistema musculoesquelético supone un punto central en el paradigma de McPoil y Hunt, y se conoce como teoría de estrés de los tejidos¹². McPoil y Hunt identifican la fuerza mecánica o tensión interna o externa que está soportando el tejido de la extremidad inferior, el tiempo de evolución de los síntomas (lesión aguda o crónica), el modo de instaurarse el dolor y la limitación que este produce respecto a la vida diaria. Se explica muy bien en la Figura 5, donde obtenemos una curva con una parte subclínica y una parte clínica en función de la tensión-deformación de diferentes tejidos del sistema musculoesquelético, como puede ser el hueso, el tendón, el ligamento, la cápsula articular y la piel. La solución que abogan estos autores consiste en disminuir es disminuir este estrés con medidas ortopédicas o con terapias física para favorecer la curación del daño tisular. Al mismo tiempo, propone utilizar programas de mejora de la elasticidad y de fuerza muscular para permitir una recuperación completa de la LS¹³.

Por otro lado, Kevin Kirby describió el comportamiento mecánico del pie según la localización espacial (lateralización y medialización) del eje de la articulación subastragalina (ASA), clasificando los pies con eje medialmente desviado de la ASA, en el que predominan los momentos netos pronadores y pies con eje lateralmente desviado de la ASA en el que predominan los momentos netos supinadores¹⁴. A su

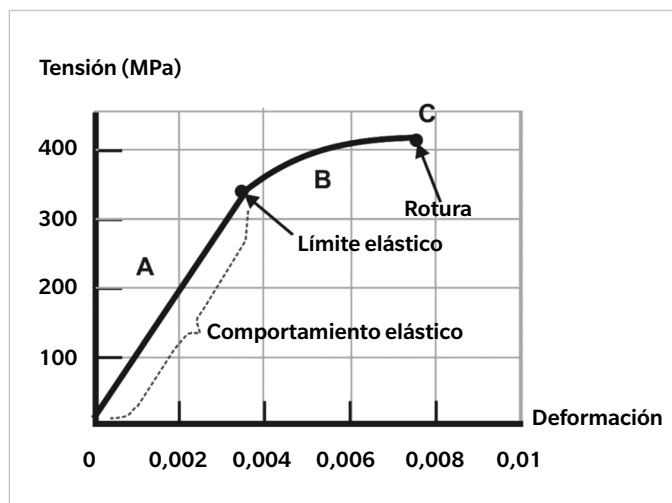


Figura 5. Gráfica Tensión-Deformación adaptada del trabajo de McPoil y Hunt¹².

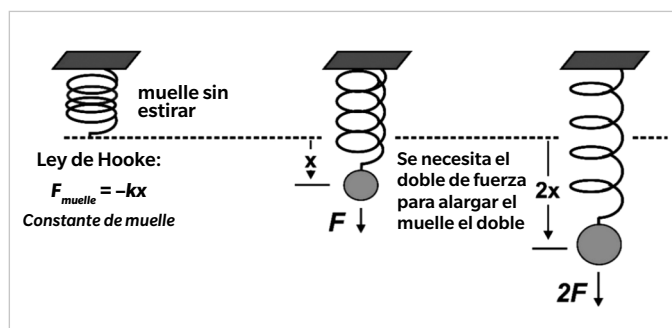


Figura 6. Ley de Hooke.

vez, Eric Fuller nos dio una clasificación parecida a la de Kirby, pero mediante el valor que se obtenía en la desviación medial o lateral del centro de presiones sobre la localización del eje de la ASA según un concepto matemático y físico elemental llamado media ponderada¹⁵.

En España, el podólogo Martín Rueda, pionero en el mundo de la podología deportiva, teorizó sobre un paradigma parecido al de Michaud¹⁶, que conocemos como modelo de las bisagras articulares. En este modelo se concibe que la mayoría de las articulaciones de las EEII, excepto la articulación mediotarsiana, se comportan como unas bisagras articulares. Personalmente, conozco muy bien el tema, ya que cuando era residente de la especialidad de medicina deportiva en la residencia Blume de Barcelona, mi jefe de Servicio, Dr. Ramón Balias Juli y el director del Centro de Alto Rendimiento (CAR) de Sant Cugat del Vallés, Dr. Joan Anton Prat Subirana, consultaron a este podólogo que podían hacer sobre las lesiones por sobrecarga que presentaban nuestros deportistas que se preparaban en el CAR para las olimpiadas de Barcelona 92 a los que se les trataban básicamente con reposo¹¹. Para este menester, se le concedió una beca de 6000 € para que diseñara la primera plataforma de presiones validada en el mundo y la cámara de moldes podomedel^{16,17}. Hoy en día, esta plataforma de presiones es la que se continúa utilizando en los diferentes CAR de España.

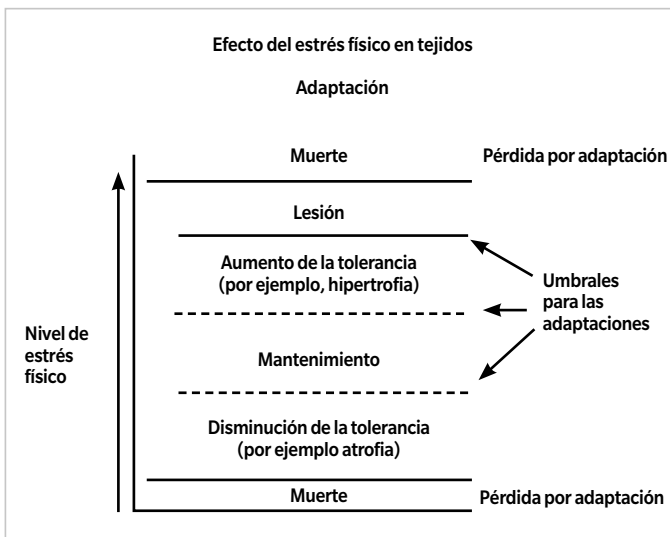


Figura 7. Paradigma de Mueller-Maluf².

Ernesto Maceira¹⁸ introdujo el concepto de conservación de la energía de la marcha para una buena economía de carrera y cómo la energía cinética se transforma en potencial, y viceversa, en el centro de masas. Considera que la marcha es un movimiento aprendido, difícil de adquirir, pero una vez aprendido es automático. Si esta marcha es eficiente, el sistema músculo esquelético tendrá que tener un mínimo apto consumo de oxígeno.

En 1986, el físico Benno Nig¹⁹ de la Universidad de Calgary en su paradigma neurobiomecánico teorizó en que las fuerzas de impacto por sí solas o la cantidad de pronación no son causa de lesiones por sobreesfuerzo, sino que es la musculatura quien debe adaptarse al suelo para así modularlas. No es partidario de zapatillas deportivas muy amortiguadas ni ortosis que hagan correcciones excesivas de las hiperpronaciones, ya que prefiere que las pronaciones hagan compensaciones en estructuras articulares superiores. En sus estudios realizó aportaciones respecto a las fuentes energéticas musculares y el papel de las mitocondrias con el VO_{2max} .

Por lo tanto, después del primitivo estudio de Cavanagh, Maceira es el tercer autor en 25 años que nos habla de consumo de oxígeno, por lo que es lógico que actualmente, y con los analizadores de gases que disponemos para estudiar el ATP y el consumo de oxígeno, se apunte un nuevo paradigma que relacione la lesiones por sobrecarga con lo que acontece a nivel molecular en la mitocondria de la célula muscular y las franjas de entrenamiento.

En el paradigma de estrés físico propuesto por Müller y Maluf² se describen los efectos que tiene el nivel de estrés físico sobre el tejido músculo esquelético cuando se le aplica un nivel bajo o alto de estrés físico. Define unos límites o umbrales de estrés físico óptimos. El aparato musculoesquelético presenta 5 adaptaciones al estrés físico: atrofia, mantenimiento, hipertrofia, rotura y muerte del tejido. Así, según estos umbrales, puede producirse una atrofia importante o una hipertrofia, respectivamente. Si aplicamos un estrés físico excesivo en un tejido, podemos producir una hipertrofia o una lesión por sobreesfuerzo. Durante la recuperación de una lesión por sobreesfuerzo podemos estimular este tejido mediante una tensión o estrés submáximo, ya que si no se aplica ningún tipo de carga se producirá una atrofia del tejido.

Por eso, Mueller define estos umbrales fisiológicos, donde se puede perjudicar o mejorar la recuperación de un tejido. Así, las lesiones por sobreesfuerzo pueden ocurrir por tres mecanismos: una alta magnitud de estrés aplicado durante un breve periodo de tiempo o un estrés de baja magnitud aplicado durante un periodo prolongado y una magnitud moderada de estrés aplicada al tejido muchas veces (Figura 7).

Proposición de un nuevo modelo de correlación

Si tenemos el modelo de estrés de tejidos¹² que correlaciona la fuerza que se aplica a un tejido con el estrés tisular del mismo, y tenemos el modelo de Mueller y Maluf² que explica la respuesta del tejido conforme al estrés sufrido sería interesante correlacionar estas ideas con el modelo fisiológico de lo que ocurre en la mitocondria muscular. Si el estrés físico de un tejido se define como la fuerza aplicada a un área determinada de tejido²⁰ parece lógico pensar que podemos ayudarnos mediante la modulación de este estrés en la rehabilitación de este tejido. El paradigma de estrés físico fue desarrollado para abordar como los tejidos, órganos y sistemas se adaptan a niveles variables de estrés físico. Los tejidos se forman a partir de células igualmente especializadas que cooperan para realizar una o más funciones especializadas y los tejidos se combinan para formar órganos. Los 4 tejidos que conforman el cuerpo humano son: el epitelial, el conectivo, el muscular y el nervioso. A los 4 tipos de tejidos es perfectamente aplicable el modelo de estrés físico. En este paradigma se definen estos umbrales o niveles inferiores o superiores de cargas en las que se puede producir desde una atrofia importante a una hipertrofia y una muerte del tejido. En el medio de estos dos extremos podemos observar un decrecimiento del tejido a la tolerancia del estímulo, un mantenimiento del tejido en función al estímulo, un incremento de la tolerancia al estímulo del tejido, la lesión del tejido y la muerte del tejido (Figura 7). No obstante, esta idea se aplica a nivel macroscópico y no aborda cuestiones moleculares o celulares. Nuestro grupo intenta plantear un modelo que se basa en qué ocurre a nivel molecular o celular del miocito. Correlacionamos estos umbrales teóricos descritos por Mueller & Maluf con los umbrales matemáticos Vt1 y Vt2 obtenidos en una PEAG. La importancia de esto radica en que estos umbrales Vt1 y Vt2, tal como hemos explicado anteriormente son matemáticos y exactos en cada paciente, pero a su vez diferentes de un paciente a otro. Por esto la cuantificación numérica que proponemos mediante parámetros fisiológicos creemos que puede resultar muy interesante en la rehabilitación de las lesiones por sobreesfuerzo. Todo esto se puede representar en las diferentes franjas de entrenamiento, y así poder seguir la progresión de cargas durante el proceso de la recuperación de las lesiones por sobreesfuerzo.

Aparte, estas ideas tienen un potencial importante en la aplicación en otros campos, ya que pueden explicar y tratar problemas primarios de tipo cardíaco o pulmonar que se manifiestan como insuficiencias cardíacas o respiratorias y que producen un desajuste físico importante. Podemos aplicar las ideas del paradigma de Mueller y Maluf para mejorar este desajuste mediante un programa de entrenamiento personalizado que siga el Vt1 y Vt2 que nos condicionarán las franjas de entrenamiento obtenidas mediante PEAG.

Lo que se pretende mediante este artículo es aportar el marco teórico para poder establecer una correlación de los umbrales des-

critos en la teoría de estrés físico con los valores del $Vt1$ y $Vt2$ para promover respuestas óptimas en la recuperación de los tejidos y franjas de entrenamiento obtenidas en una PEAG, lo que permitiría que se diseñen programas de rehabilitación de un tejido o órgano afectado desde un punto de vista científico y matemático cuantificable mediante la fisiología del esfuerzo que acontece en la mitocondria del músculo. Se propone las franjas de entrenamiento aeróbico extensivo y después intensivo como un buen complemento en el tratamiento de las lesiones por sobreesfuerzo, ya que es la franja donde se produce un aumento en el número de mitocondrias, y por tanto una mejora en el consumo de O_2 . Reservamos las franjas después del $Vt2$, es decir, anaeróbico extensivo e intensivo para los casos que ya exista una recuperación total de la lesión, ya que en estas mejorará el $Vt2$, y por tanto alargaremos el tiempo en que nos aparezca la fatiga (léase lesión por sobrecarga). Estas franjas están bien definidas tanto en pulsaciones como en % del VO_{2max} entre el $Vt1$ y el $Vt2$. Sabemos que el músculo es un tejido muy adaptable de la misma forma que lo son los tendones, ligamentos, cápsulas articulares, etc.²¹. Por lo que una rehabilitación activa cuantificable podría ser beneficiosa. A su vez, no debemos olvidar el papel que hacen los dispositivos ortopédicos diseñados a disminuir el estrés físico en los tejidos biológicos, siendo imprescindibles en el tratamiento de estas lesiones por sobreesfuerzo. En el mundo del deporte, entendemos que si se sigue este sistema de rehabilitación de forma integrada, la vuelta a jugar podría ser más rápida y segura evitando recaídas o retrasos innecesarios en la recuperación²¹.

Reflexiones finales

Aunque es evidente la necesidad de investigación en esta área, la idea del presente artículo es buscar una nueva aplicación de las PEAG, correlacionando el paradigma de estrés físico propuesto por Mueller y Maluf con las lesiones por sobreesfuerzo, especialmente a nivel muscular.

Lo primero que acontece cuando un deportista tiene una lesión por sobrecarga y no puede entrenar como es debido es una disminución en el % O_2 , por lo que es interesante seguir con la estimulación del músculo, ya que la atrofia de este guardará relación directa con el % O_2 , ya que no hemos de olvidar que el ATP aparte del que tenemos de reserva que es escaso, se produce en el miocito, ya sea en su citoplasma o en su mitocondria. Una vez superada esta lesión por sobrecarga, el deportista irá mejorando su condición física mediante un entrenamiento integral y los últimos días tendría que trabajar la eficiencia mecánica.

Reconocemos que falta hacer muchos más estudios sobre este tema. No es el objetivo de este trabajo, ya que solo pretendemos marcar referencias incipientes sobre la relación entre fisiología del esfuerzo y lesión por sobrecarga desde el punto de vista mecánico. La fisiología del esfuerzo da una medición cuantitativa de diferentes parámetros y en investigación, cuando podemos medir las cosas, ya hemos solucionado parte del problema. Investigar solo con parámetros cualitativos por muy validado que esté el estudio siempre está más sujeta a errores e inexactitudes. Sabemos que con este trabajo únicamente proponemos un modelo teórico como lo son los otros paradigmas descritos, y que hoy en día solo es un esbozo de idea que tiene que profundizarse y validarse mediante la realización de

estudios, pero como todos los paradigmas pueden hacer buenas y malas aportaciones.

El modelo de estrés físico tiene limitaciones, ya que implica integrar una serie de enfoques y evidencias en un solo principio y más cuando las lesiones por sobrecarga presentan diferentes viabilidades tisulares y tratamientos. Mediante este artículo planteamos posibles valoraciones futuras de las lesiones por sobreesfuerzo por procedimientos moleculares de lo que acontece en la producción energética del músculo. Reconocemos que presentan limitaciones importantes, pero estamos confiados en que los estudios del futuro van a correlacionar mediante inteligencia artificial, lo que ocurre en la fisiología energética del músculo, ya que en el metabolismo basal del músculo no existen lesiones por sobreesfuerzo. Actualmente se decide cuál tiene que ser el tratamiento de un carcinoma de pulmón, ya sea mediante cirugía o quimioterapia en función del porcentaje de aprovechamiento del O_2 , lo que condiciona una posible curación si se hace cirugía a un pronóstico infausto si solo se hace quimioterapia²². La medicina se hace cada día con más precisión y esta precisión se obtiene no estudiando la macroscopia del tejido, sino la microscopia de este. Igualmente, la inteligencia artificial muy probablemente podrá hacer en un futuro no muy lejano el estudio molecular o ultramolecular de estas vías de producción de energía.

Creemos que los umbrales de respuesta de los tejidos propuestos por Mueller y Maluf para el tratamiento de las lesiones por sobreesfuerzo²² podrían tener un parangón con las franjas de entrenamiento que hay entre $Vt1$ y $Vt2$, es decir, el entrenamiento aeróbico extensivo y el aeróbico intensivo. Cuando se realiza rehabilitación cardiaca en una insuficiencia cardiaca se trabaja por debajo de $Vt2$, y lo mismo, cuando se trata un desacondicionamiento o deterioro físico importante, también hay que trabajar por debajo de $Vt2$, ya que es cuando se obtienen los mejores beneficios de un programa de actividad física.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Financiación

Ninguna.

Contribución de los autores

Concepción y diseño del estudio: FPSA, VPP.

Recogida de datos: FPSA, VPP.

Análisis e interpretación de los resultados: FPSA, VPP.

Creación, redacción y preparación del boceto inicial: FPSA, VPP.

Revisión final: FPSA, VPP, XOD, CEM, OHG.

Bibliografía

1. Cavanagh PR, Williams KR. The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Med Sci Sports Exerc.* 1982;14(1):30-5. DOI: 10.1249/00005768-198201000-00006.
2. Mueller MJ, Maluf KS. Tissue adaptation to physical stress: a proposed "Physical Stress Theory" to guide physical therapist practice, education, and research. *Phys Ther.* 2002;82(4):383-403.
3. González Peris M. Guía de prescripción de l'exercici físic per a la salut. Barcelona: Generalitat de Catalunya; 2022.
4. Pifarré San Agustín F, Rosselló L, Hileño R, Palmi J, Bañares L, Planas A, et al. The use of oxygen as a possible screening biomarker for the diagnosis of chronic fatigue. *Apunts Sports Med.* 2022;57(214):100379. DOI: 10.1016/j.apunsm.2022.100379.

5. López Chicharro J, Fernández Vaquero A. Fisiología del ejercicio físico. Madrid: Editorial Panamericana; 2008.
6. Robergs RA, Dwyer D, Astorino T. Recommendations for improved data processing from expired gas analysis indirect calorimetry. *Sports Med.* 2010;40(2):95-111. DOI: 10.2165/11319670-000000000-00000.
7. Galiano Orea D, Rueda Sánchez M. El pie del jugador de baloncesto y su influencia ante lesiones a distancia. *Archivos de medicina del deporte: federación española de medicina del deporte y de la confederación iberoamericana de medicina del deporte.* 1996;13(52):149-53.
8. Grimaldi Puyana M, Cuadrado Reyes J. Medios para cuantificar la carga interna de entrenamiento de equipo. La frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno, la concentración de lactato en sangre y la percepción subjetiva del esfuerzo: un a revisión. Madrid: PubliCE Standard; 2011.
9. Pifarré F, Sanuy X, Rosselló L, Blázquez J, Gil G, Reig F, et al. El aprovechamiento de oxígeno como un posible biomarcador en el síndrome de fatiga crónica. En: Rosselló i Aubach L, Montesó Curto P (ed.). *Síndromes de sensibilización central y actividad física* Tarragona: URV publicacions; 2019. p. 79-99.
10. Nijs J, De Meirleir K. Prediction of peak oxygen uptake in patients fulfilling the 1994 CDC criteria for chronic fatigue syndrome. *Clín Rehabil.* 2004;18(7):785-92. DOI: 10.1191/0269215504cr751oa.
11. Pifarré San Agustín F. *Física y Biomecánica para fisioterapeutas o podólogos.* Lérida: Ediciones de la Universidad de Lérida; 2021.
12. McPoil TG, Hunt GC. Evaluation and management of foot and ankle disorders: present problems and future directions. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1995;21(6):381-8. DOI: 10.2519/jospt.1995.21.6.381.
13. McPoil TG, Schuit D, Knecht HG. A comparison of three positions used to evaluate tibial varum. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1988;78(1):22-8. DOI: 10.7547/87507315-78-1-22.
14. Kirby KA. Rotational equilibrium across the subtalar joint axis. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1989;79(1):1-14. DOI: 10.7547/87507315-79-1-1.
15. Rueda Sánchez M. *Los desequilibrios del pie.* Barcelona: Paidotribo; 2004.
16. Montaña Vidal A. Sistema de análisis plantar y biomecánica de la marcha humana mediante plataformas optométricas de luz no estable (PONLE). *Podol Clin.* 2004;Nº Extra:50-61.
17. Maceira Suárez E. Análisis cinemático y cinético de la marcha humana. *Rev Pie y tobillo.* 2003;17(1):29-37.
18. Nigg BM, Nurse MA, Stefanyshyn DJ. Shoe inserts and orthotics for sport and physical activities. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(7 Suppl):S421-8. DOI: 10.1097/00005768-199907001-00003.
19. Fukubayashi T, Kurosawa H. The contact area and pressure distribution pattern of the knee. A study of normal and osteoarthrotic knee joints. *Acta Orthop Scand.* 1980;51(6):871-9. DOI: 10.3109/17453678008990887.
20. Pedret C, Rodas G, Balius R, Capdevila L, Bossy M, Vernooij RW, et al. Return to Play After Soleus Muscle Injuries. *Orthop J Sports Med.* 2015;3(7):2325967115595802. DOI: 10.1177/2325967115595802.
21. Nawoor-Quinn Z, Oliver A, Raobaikady R, Mohammad K, Cone S, Kasivisvanathan R. The Marsden Morbidity Index: the derivation and validation of a simple risk index scoring system using cardiopulmonary exercise testing variables to predict morbidity in high-risk patients having major cancer surgery. *Perioper Med (Lond).* 2022;11(1):48. DOI: 10.1186/s13741-022-00279-8.
22. Pifarré San Agustín F, Escoda Mora J, Casal Castells A, Prats Armengol T, Carles Gomá S, Levy Benasuly AE. Las lesiones por sobrecarga en las extremidades inferiores desde el punto de vista biomecánico. *Rev Int Cienc Podol.* 2016;10(2):106-21.