



VNiVERSiDAD D SALAMANCA

E. U. de Enfermería y Fisioterapia

Titulación: Grado en Fisioterapia

TRABAJO FIN DE GRADO

Tipo de Trabajo: Trabajo de Revisión Bibliográfica Sistemática

Título:

METABOLISMO MUSCULAR EN EL EJERCICIO
MUSCLE METABOLISM DURING EXERCISE

Estudiante: Laura Martín Martín

Tutor: José Manuel González De Buitrago Arriero

Salamanca, 15 de Junio de 2017

ÍNDICE

Resumen.....	III
Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Estrategia de búsqueda y selección de estudios.....	3
Síntesis y análisis de los resultados.....	4
1. Estructura del músculo esquelético.....	4
2. Sustratos de energía del tejido muscular.....	5
2.1. Creatinfosfato muscular.....	6
2.2. Sistema anaeróbico láctico o del ácido láctico.....	6
2.3. Sistema aeróbico u oxidativo.....	6
3. Sistemas de energía respecto al tipo de ejercicio.....	8
4. Consumo de oxígeno y umbral anaeróbico.....	8
5. Tipos de fibras musculares y su metabolismo.....	10
5.1. Fibras tipo I.....	10
5.2. Fibras tipo IIa.....	10
5.3. Fibras tipo IIb.....	10
6. Situación hormonal en el ejercicio.....	12
7. Contribución energética de los nutrientes en el ejercicio.....	12
7.1. Macronutrientes.....	13
7.1.1. Proteínas.....	13
7.1.2. Hidratos de carbono.....	16
7.1.3. Grasas.....	19
7.2. Micronutrientes.....	21
7.2.1. Vitaminas.....	21
7.2.2. Minerales.....	22
Conclusión.....	22
Bibliografía.....	24

RESUMEN

Fundamentos: Cada vez son más las personas que realizan algún tipo de actividad física, pero pocas son las que poseen un verdadero conocimiento de los procesos que se desencadenan a nivel muscular y la influencia de la alimentación en la misma. El objetivo de este trabajo es ofrecer información de manera general sobre el metabolismo muscular.

Métodos: Revisión bibliográfica de artículos y documentos consultando bases de datos y libros. La mayor parte del análisis ha sido extraído principalmente de tomos debido a que los artículos se relacionaban con enfermedades o suplementos, principal criterio de exclusión.

Resultados: Aunque en general todos los textos revisados evidencian datos similares y coinciden en las explicaciones del metabolismo, si se ha encontrado polémica respecto al asunto de la suplementación deportiva.

Conclusión: La recogida de información sirve como base para el entendimiento del metabolismo muscular. Sin embargo, es un tema que abarca multitud de conceptos y circunstancias fisiológicas complejas, por lo que se debe continuar indagando e investigando qué ocurre en el tejido muscular y cómo interfieren los distintos compuestos biológicos (nutrientes, hormonas, enzimas, etc) en el músculo esquelético, tanto durante el momento de realizar ejercicio como en los periodos cercanos al mismo.

Palabras clave: Ejercicio. Sustrato. Energía. Músculo. Nutriente.

INTRODUCCIÓN

La práctica de ejercicio físico está teniendo una considerable repercusión a nivel mundial durante los últimos años. El hecho de que cada día más personas toman la decisión de realizar algún tipo de deporte es evidente y se ve notoriamente reflejado en los distintos medios de comunicación y redes sociales, los cuales retransmiten y nos permiten ser conocedores de noticias tales como *El 'boom' del running* o *El 'boom' del culto al cuerpo*.

El auge de la actividad física, ya sea por estética, diversión, salud o mera moda también se manifiesta en el reciente incremento de pruebas deportivas o en el gran número de aplicaciones disponibles para aparatos electrónicos. Su finalidad, cubrir la demanda para ayudar, motivar y monitorizar diversos parámetros fisiológicos de quienes se animan a realizarla.

Más exactamente y según la Encuesta de Hábitos Deportivos en España 2015 elaborada cada 5 años por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, se estima que el 46,2% de las personas mayores de 15 años realiza algún tipo de actividad semanalmente, un 9,2% más que en la última encuesta¹.

A estas alturas nadie duda que la práctica deportiva es un hábito que cuenta con múltiples beneficios para la salud. A través de ella se ejercita el organismo, lo que favorece la prevención de numerosas enfermedades, sobre todo de tipo cardiovascular. Su contribución a la hora de disminuir la grasa corporal la convierte en un buen método para prevenir la obesidad. Respecto al aparato locomotor, dota al cuerpo de una mayor movilidad articular y capacidad de reacción, siendo fundamental a fin de evitar patologías como artrosis, osteoporosis, lumbalgias, desgarros musculares y envejecimiento general. Asimismo, el deporte ayuda a eliminar la sensación de malestar, de cansancio y la baja autoestima.

Ahora bien, el ejercicio también puede resultar perjudicial para la salud si no se emplean las técnicas adecuadas y no se tiene un mínimo entendimiento de la fisiología del organismo, en especial del músculo esquelético, principal impulsor del movimiento mediante la contracción.

Todo ello se refiere al metabolismo muscular, es decir, al conjunto de reacciones químicas que efectúan las células, en este caso musculares, con el fin de sintetizar o degradar sustancias. Esto supone conocer los tipos de fibras y los sustratos y sistemas de energía utilizados por las mismas, lo que tiene una estrecha relación con la alimentación, puesto que a través de ella ingerimos los macronutrientes y micronutrientes necesarios para el correcto funcionamiento del cuerpo.

Como destaca Àlex Merí en su libro *Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte*:

“La nutrición deportiva es una ciencia básica para el rendimiento deportivo. [...] Es esencial porque incide directamente sobre el rendimiento y salud de las personas que realizan ejercicio físico. Más allá del rendimiento deportivo, saber confeccionar una dieta equilibrada es vital para inculcar buenos hábitos alimenticios en una sociedad dominada por el estrés y la comida rápida².”

En mi opinión es un asunto interesante y relevante que en gran medida afecta a la vida diaria de las personas, ya que como bien dice el dicho “somos lo que comemos”. Esto, unido a mi gusto por el deporte y por llevar un estilo de vida saludable son los principales motivos que me han impulsado a elegir dicho tema.

OBJETIVOS

Este estudio se plantea con el objetivo de analizar y presentar de forma general las características básicas del metabolismo muscular, considerando igualmente la estructura del tejido muscular y la función que desempeñan los compuestos biológicos (macronutrientes y micronutrientes) en el mismo cuando se trata de realizar actividad física.

La intención es plasmar la información de manera no muy compleja con el propósito de que sea útil y sirva como cimiento para todas aquellas personas que se dispongan a adentrarse en el “mundillo” deportivo.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ESTUDIOS

Se ha realizado una revisión bibliográfica sistemática de documentos que describen o estudian los procesos que ocurren a nivel del músculo esquelético cuando se realiza ejercicio físico, es decir, el metabolismo muscular.

En primer lugar se hizo una intrusión en la base de datos PubMed con distintas ecuaciones de búsqueda: “muscle metabolism” AND “exercise”, “protein” AND “exercise”, “fatty acid” AND “exercise”, “carbohydrates” AND “exercise”. Se introdujo como filtro el idioma, seleccionando español o inglés. Además, el estudio se limitó a aquellos artículos relacionados con la especie humana que ofreciesen gratuitamente el texto completo. En cuanto a la fecha de publicación no se estableció ninguna restricción.

Posteriormente se llevó a cabo una búsqueda en Google Scholar, tanto en inglés como en español, de artículos y documentos que pudieran aportar algo de información sobre el tema a tratar, en la cual no se incluyó ningún otro filtro o límite.

Al elaborar la revisión bibliográfica en base al metabolismo muscular contemplado desde un punto de vista fisiológico para la población general y efectuar estas indagaciones, surgió un pequeño inconveniente: la gran mayoría de los artículos enlazaban el tema a estudiar con algún tipo de patología, principal criterio de exclusión fijado para este trabajo. Por el mismo motivo fue descartado todo aquel artículo que relacionaba el metabolismo del músculo esquelético con un método o suplemento deportivo en concreto.

En vista a la limitación que conllevó este método de búsqueda, a través del cual sólo se pudo conseguir algo de información como se probará posteriormente, se encaminó la misma a una serie de libros extraídos de diferentes bibliotecas públicas, entre los que destacan ejemplares de “Fundamentos de Bioquímica” y “Fundamentos de Fisiología del Ejercicio, Actividad Física y Deporte”. Gracias a este recurso se logró comparar, esclarecer y explicar de forma global cómo funciona el metabolismo muscular en cuanto al ejercicio físico se refiere.

SINTESIS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. ESTRUCTURA DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO

El músculo esquelético es un tejido voluntario que tiene la capacidad de transformar el ATP (energía química) en energía para realizar movimiento o trabajo (energía mecánica)².

Está compuesto por haces o grupos paralelos de fibras que pueden ser observadas como células con una gran cantidad de núcleos, en torno a 100-200. Estas fibras se encuentran formadas a su vez por miofibrillas, las cuales están constituidas por sarcómeros³.

Un sarcómero consiste en una unidad funcional básica que se repite y que posee dos tipos de filamentos, delgados y gruesos. Éstos contienen esencialmente dos proteínas diferentes, denominadas actina y miosina; la primera forma parte de los filamentos delgados, mientras que la segunda es el principal componente de los gruesos. Asimismo, existen dos proteínas que se engloban junto con la actina en aquellos, la troponina y la tropomiosina³.

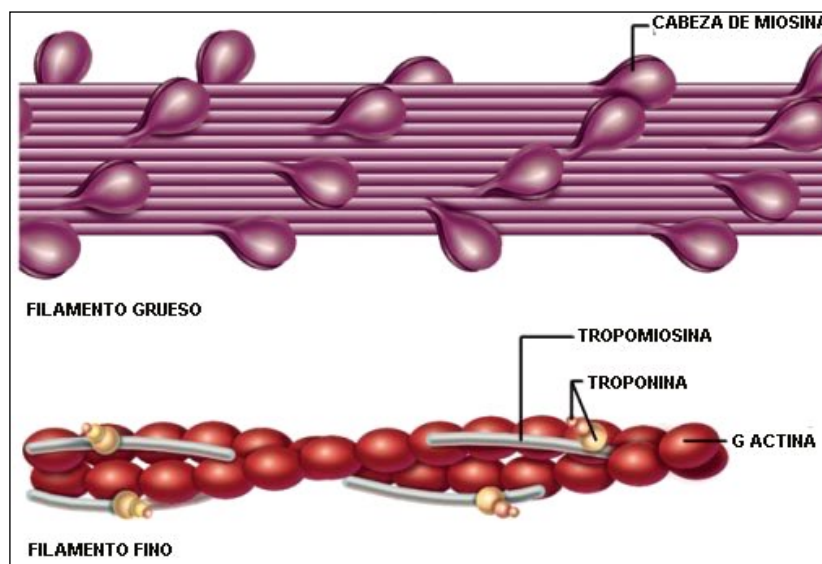


Fig. 1. Componentes de los miofilamentos².

Para que el músculo se contraiga es imprescindible la llegada de iones de calcio desde el retículo sarcoplásmico hasta los filamentos con el fin de unirse a la troponina. Como consecuencia de esta unión, la troponina cambia su conformación y

la tropomiosina se desplaza, quedando libre el sitio activo de la actina para que pueda acoplarse la miosina. Sin embargo, esta debe ser previamente activada por una molécula de ATP, la cual se hidroliza y genera la energía necesaria para establecer la fusión mediante unas uniones llamadas puentes cruzados. Una vez constituida, la liberación del fosfato inorgánico hace que la unión se fortalezca y después, cuando el ADP se libera, el filamento grueso desplaza al filamento delgado. Posteriormente llega otra molécula de ATP, inhibe la interacción entre ambas proteínas y la miosina se separa. Lo que ocurre ahora es que el ATP vuelve a hidrolizarse haciendo que se repita el anterior proceso, por lo que los puentes cruzados se van formando y rompiendo repetidamente^{2,3}.

De esta forma se produce un deslizamiento de los filamentos delgados sobre los gruesos, surgiendo así la contracción muscular. Este sistema podría compararse con el mecanismo de una cremallera².

Con respecto a las fibras musculares se distinguen tres tipos, I, IIa y IIb, de los cuales se hablará con más detalle en los siguientes apartados del trabajo^{2,3}.

2. SUSTRATOS DE ENERGÍA DEL TEJIDO MUSCULAR

Dicho a grandes rasgos, el ATP obtenido en el proceso definido anteriormente, aporta energía para que las fibras musculares se contraigan con la finalidad de llevar a cabo la actividad física oportuna.

Sin embargo, su concentración celular es únicamente de 5-6 mmoles por gramo de fibra muscular. Al ser una cantidad bastante reducida esta energía solo es capaz de generar contracciones intensas de aproximadamente 2-4 segundos⁴.

De esta manera, para mantener la función muscular se necesita conseguir nuevo ATP degradando moléculas más complejas provenientes de otras fuentes. Estas fuentes o sustratos energéticos corresponden a los hidratos de carbono, las grasas, las proteínas y el creatinfosfato⁴.

El ATP formado gracias a estos sustratos se consigue a través de tres vías o sistemas diferentes, los cuales van a ser explicados a continuación.

2.1. Creatinfosfato muscular

Esta vía del creatinfosfato-ATP es también denominada sistema anaeróbico aláctico o sistema del fosfágeno y se produce en el sarcoplasma del músculo. Su utilización posibilita conseguir energía de manera muy rápida y sin necesidad de oxígeno mediante la fosforilación del ADP presente^{2, 4}.

La gran desventaja que presenta es que la suma de ATP que produce es pequeña, con unos valores de 0,6 moles en varones y 0,3 moles en mujeres⁴.

2.2 Sistema anaeróbico láctico o del ácido láctico

El principal sustrato de esta vía son los hidratos de carbono, más concretamente el glucógeno almacenado en los músculos, que se transforma en glucosa por el proceso de la glucogenólisis^{2, 4}.

Como bien indica su nombre, este sistema no precisa de oxígeno para generar nuevo ATP, logrado por fosforilación a nivel de sustrato o, lo que es lo mismo, por glucólisis anaeróbica^{2, 4}.

Constituye un mecanismo rápido de producción de ATP, aunque en menor medida que el creatinfosfato. No obstante, se encuentra el mismo inconveniente, es decir, la obtención de energía sigue siendo pequeña para mantener una actividad muscular prolongada, alrededor de 2 ATP por molécula de glucosa⁴.

Otra desventaja que presenta es que origina un metabolito de desecho, el ácido láctico, el cual se almacena en los músculos y líquidos corporales. Al ser un ácido el pH muscular disminuye, lo que termina afectando nocivamente a las enzimas encargadas de la glucogenólisis y a la propia contracción⁴.

2.3 Sistema aeróbico u oxidativo

Este mecanismo utiliza los tres macronutrientes, hidratos de carbono, grasas y proteínas, como sustratos.

El sistema oxidativo depende del oxígeno, por lo que es más lento que los anteriores. Sin embargo, aporta una gran cantidad de energía debido a su alto rendimiento y a las grandes provisiones de combustible, sobre todo de grasa^{2,4}.

En el caso de los hidratos de carbono ocurre lo mismo que en el sistema anaeróbico, con la diferencia de que ahora la glucólisis es aeróbica. Gracias al sustrato del glucógeno se pueden obtener 1055 kilocalorías, o incluso más dependiendo de la masa muscular que se disponga⁴.

Los depósitos de grasa corporal son elevados y su capacidad potencial es mucho mayor que la capacidad física que supone realizar un ejercicio prolongado y de manera continuada, apareciendo mucho antes la fatiga que el agotamiento de este sustrato de energía. Se utilizan en mayor proporción los ácidos grasos almacenados en el tejido adiposo, los triglicéridos musculares y los ácidos grasos presentes en la sangre. Ante un ejercicio aeróbico ligero se da la lipólisis del tejido adiposo, mientras que ante un ejercicio aeróbico intenso predomina el empleo de los triglicéridos musculares⁴.

Respecto a las proteínas cabe decir que aunque su capacidad potencial también es elevada, no alcanza ni mucho menos la de la grasa. De hecho, es poco frecuente el uso de las mismas como fuente de combustible, ya que prevalecen los hidratos de carbono y las grasas, siendo la cantidad de proteína inversamente proporcional a la cantidad de hidratos y grasas⁴.

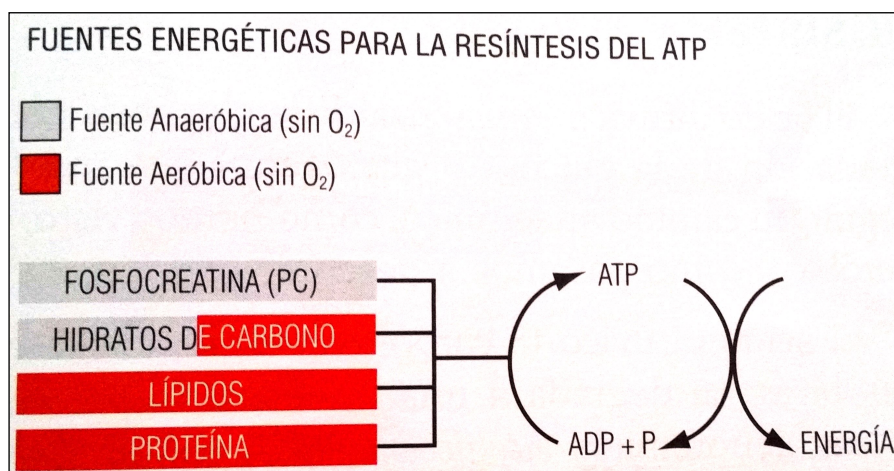


Fig. 2. Fuentes de energía y vías para reponer el ATP².

3. SISTEMAS DE ENERGÍA RESPECTO AL TIPO DE EJERCICIO

La duración y la intensidad del deporte o actividad física que se vaya a llevar a cabo determinará qué sistema o sustrato energético va a ser empleado⁴.

En la siguiente tabla se muestra de manera breve y general esta comparativa.

TIPO DE EJERCICIO	SISTEMA ENERGÉTICO PREDOMINANTE	VELOCIDAD MÁXIMA DE PROVISIÓN DE ATP	CAPACIDAD DE SUMINISTRO DE ATP
Ejercicios de máxima intensidad y mínima duración (<30'')	Sistema del creatinfosfato	3,6 moles/minuto	0,6 moles (se agota en 10'')
Ejercicios en menor grado de intensidad y con mayor duración (30''-1,5')	Sistema del creatinfosfato + sistema del ácido láctico*	1,6 moles/minuto	Suficiente para saldar la velocidad de demanda
Ejercicios de algo menos de intensidad y algo más de duración (1,5-3')	Sistema del ácido láctico + sistema aeróbico*	1 mol/minuto	Prácticamente ilimitada
Ejercicios de menor intensidad y duración superior (>3')	Sistema aeróbico	1 mol/minuto	Prácticamente ilimitada

Tabla 1. Comparación de variables energéticas en función de la intensidad y duración del ejercicio realizado⁴.

4. CONSUMO DE OXÍGENO Y UMBRAL ANAERÓBICO

El incremento del consumo de oxígeno como consecuencia de la actividad física varía de unas personas a otras. Influyen factores como el nivel de entrenamiento que posee cada individuo o la intensidad con que se desarrolla dicha actividad⁴.

Así, mientras que un sujeto no entrenado suele presentar un consumo de oxígeno en reposo de unos 0,25 L/min, una persona entrenada puede consumir incluso dos veces más, 0,75 L/min⁴.

Una vez iniciado el ejercicio el consumo de oxígeno se eleva gradualmente y más aún si aumenta la intensidad del mismo. Sin embargo, llega un punto en el que ante un mayor esfuerzo no se produce una subida en el consumo de oxígeno. En dicho momento se alcanza el límite fisiológico o máximo consumo de oxígeno. Como es de esperar, aquí también existe diferencia entre personas no entrenadas y entrenadas, llegando al límite a los 4-4,5 L/min y a los 5,5-6 L/min, respectivamente^{4,5}.

En cuanto al ácido láctico sucede lo contrario, va aumentando sutilmente al principio pero se alcanza un punto de gran inflexión en el que se ve un claro incremento del mismo. Este punto corresponde al llamado umbral anaeróbico, que aparece más tarde en los sujetos entrenados (en torno al 80% volumen máximo de oxígeno) que en los no entrenados (alrededor del 65% del consumo máximo de oxígeno)^{4,5}.

El hecho de que en los individuos no entrenados aparezca antes la fatiga se debe a esto precisamente, ya que una elevada cantidad de ácido láctico lleva a un estado de lactacidemia que tiene como consecuencia la fatiga muscular⁴.

Parece ser que el motivo de que una persona entrenada produzca una menor dosis de lactato y posea una mayor resistencia física no es el mayor aporte de oxígeno que recibe el músculo esquelético, sino las consecuencias metabólicas de las adaptaciones bioquímicas que tienen lugar en los músculos⁶.

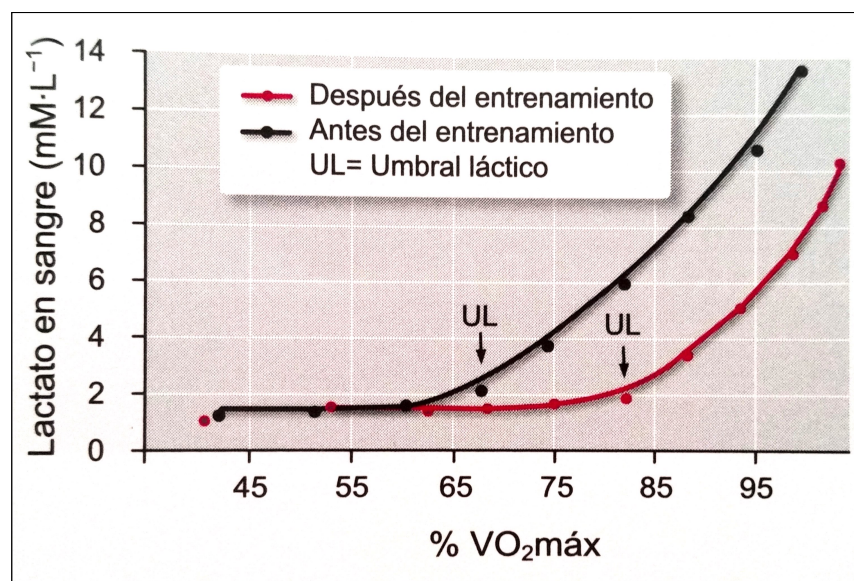


Fig. 3. Efectos del entrenamiento de resistencia aeróbica sobre la respuesta del lactato sanguíneo en un ejercicio⁵.

5. TIPOS DE FIBRAS MUSCULARES Y SU METABOLISMO

Como se comentó en el primer punto, se diferencian tres tipos de fibras musculares, cada una de las cuales tiene tendencia a utilizar un determinado sistema energético.

5.1. Fibras tipo I

También son denominadas fibras rojas de contracción lenta. Al ser de contracción lenta y una vez han sido explicados los tres sistemas de energía, se puede intuir que su metabolismo dominante es el aeróbico. De esta manera se concluye que las fibras tipo I utilizan mayoritariamente el sistema aeróbico para conseguir energía^{2,4}.

5.2. Fibras tipo IIa

Igualmente reciben el nombre de fibras rojas de contracción rápida. En este caso, a pesar de que las características son semejantes a las anteriores, emplean tanto el sistema aeróbico como el anaeróbico, disponiendo así de capacidad glucolítica anaeróbica correspondiente al sistema del ácido láctico^{2,4}.

5.3. Fibras tipo IIb

Son asimismo conocidas como fibras blancas de contracción rápida. Su metabolismo es fundamentalmente anaeróbico, por lo que usan el sistema del ácido láctico y el sistema del fosfágeno^{2,4}.

TIPO DE FIBRA	Fibras I	Fibras IIa	Fibras IIb
DIÁMETRO	Pequeño	Intermedio	Grande
RESISTENCIA A LA FATIGA	Alta	Intermedia	Baja
VELOCIDAD DE CONTRACCIÓN	Lenta	Rápida	Rápida
FUERZA	Poca	Intermedia	Mucha
PRINCIPAL SISTEMA DE ENERGÍA	Aerobio	Aerobio/Anaerobio	Anaerobio

Tabla 2. Características de las diferentes fibras musculares.

Una vez distinguidos los tres tipos de fibras musculares esqueléticas es lógico y preciso pensar que las fibras rojas de contracción lenta o tipo I son las que contienen un mayor número de mitocondrias, puesto que estas constituyen los orgánulos celulares especializados en proporcionar la mayor cantidad de energía aeróbica, imprescindible para la actividad de la célula o “respiración celular”⁷.

Bien, pues además de esto y como consecuencia de ello, está demostrado que las fibras tipo I poseen una mayor capacidad de oxidar piruvato y ácidos grasos. De hecho, al tener almacenadas una buena suma de triglicéridos y glucógeno, logran utilizar los ácidos grasos como principal fuente de combustible. La mayor concentración de mitocondrias deriva también en un mayor nivel de enzimas mitocondriales, aproximadamente dos veces superior que en las fibras de contracción rápida o tipo II^{2, 7}.

En cuanto a las fibras rápidas no se aprecia una diferencia relevante entre fibras rojas y blancas, enzimáticamente hablando. Cabe mencionar que las fibras blancas o IIb degradan prontamente el ATP con fines contráctiles debido a su alta concentración de ATPasa y que usan el glucógeno vía anaeróbica como surtidor mayoritario de energía al carecer de competencia para aprovechar grasa o glucógeno vía aeróbica⁷.

Si se relaciona la información otorgada con el ejercicio físico se evidencia que:

“A pesar de que en general las personas contienen un 50% de fibras lentas y un 50% rápidas, los individuos que practican regularmente actividades deportivas de resistencia suelen contar con un porcentaje superior de fibras lentas, mientras que los velocistas o culturistas tienden a ser aventajados de las fibras rápidas⁷.”

No se ha demostrado que las fibras tipo II puedan transformarse en fibras tipo I, ni viceversa. Ahora bien, un individuo acostumbrado a realizar entrenamientos de resistencia vigorosos, debido a la respuesta de los mismos, alcanza niveles casi inexistentes de fibras blancas, las cuales se sugiere que podrían sufrir una conversión a fibras rojas de contracción rápida⁷.

Otra consecuencia del entrenamiento de resistencia de alta intensidad es que el número de mitocondrias de las fibras rápidas se incrementa más en comparación con las lentas, de tal manera que la diferencia en los niveles enzimáticos comentada previamente, prácticamente desaparece⁷.

6. SITUACIÓN HORMONAL EN EL EJERCICIO

Las hormonas juegan un papel importante en la regulación del cuerpo para su correcto funcionamiento, por lo que también influyen a la hora de desarrollar una actividad física o deportiva con el fin de llevar un control para que no se genere ningún desorden o alteración. Entre sus muchas funciones cabe destacar la regulación de la utilización de los sustratos de energía, así como su captación muscular y su liberación hepática^{4, 8}.

Durante la realización de ejercicio acaecen distintos fenómenos hormonales en el músculo esquelético, algunos de los cuales son:

- Aumenta la secreción de catecolaminas, favoreciendo la degradación del glucógeno^{4, 8}.
- Se incrementa la liberación de glucagón, lo que facilita la glucogenólisis y la gluconeogénesis hepática^{4, 8}.
- Aumenta la secreción de cortisol y con ello tiene lugar el catabolismo de proteínas^{4, 8}.
- Disminuye la insulina y se incrementa la sensibilidad de las células. Esto produce un reclutamiento de receptores para la glucosa y una estimulación de su captación muscular^{4, 8}.
- Aumenta la hormona de crecimiento, por lo que disminuye la captación de glucosa por parte de las células^{4, 8}.

7. CONTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LOS NUTRIENTES EN EL EJERCICIO

El metabolismo se puede simplificar en dos funciones esenciales. Por un lado se encuentra el anabolismo, basado en la síntesis, formación, ensamblaje de moléculas

pequeñas con la finalidad de construir tejidos y moléculas complejas. Para crear estructuras biológicas es imprescindible disponer de materiales o elementos básicos. Por otro lado está el catabolismo, que consiste en la descomposición de moléculas complejas en otras más sencillas².

Los alimentos y el agua que tomamos diariamente nos aportan los nutrientes y líquidos que nuestro organismo necesita para abastecer las reservas energéticas, para el desarrollo del mismo, etc^{4, 8}.

Estos nutrientes se clasifican principalmente en dos grupos: los macronutrientes, divididos a su vez en proteínas, carbohidratos y grasas; y los micronutrientes, que corresponden a las vitaminas y minerales^{4, 8}.

7.1. Macronutrientes

Las proteínas, los hidratos de carbono y los lípidos son macronutrientes que al ser consumidos se degradan durante el proceso de digestión en sus unidades básicas: aminoácidos, monosacáridos y ácidos grasos, respectivamente, mediante reacciones catabólicas. Posteriormente estas unidades se utilizan para cubrir las necesidades de nuestro organismo, ayudando a mantener y mejorar su integridad funcional y estructural⁸.

Dado que un deportista consume en su día a día más energía que un individuo sedentario, el deportista va a tener una mayor demanda nutricional para aprovisionar al cuerpo de suficiente energía⁴.

7.1.1. Proteínas

Existen muchas clases de proteínas, sin embargo todas están compuestas por unas unidades básicas llamadas aminoácidos, con un grupo amino en su estructura (NH₂) que incluye nitrógeno. Hay 21 aminoácidos que se catalogan en dos tipos, los esenciales, los cuales deben ser administrados con la dieta debido a que nuestro cuerpo no es capaz de sintetizarlos, y los no esenciales, que si pueden ser formados en el organismo^{2, 8}.

ESENCIALES	NO ESENCIALES
Leucina, isoleucina, valina, lisina, fenilalanina, metionina, treonina, triptófano, histidina y arginina	Taurina, tirosina, cisteína, glicina, serina, prolina, glutamina, alanina, glutamato, asparagina, aspartato

Tabla 3. Aminoácidos esenciales y no esenciales⁸.

La primordial función de las proteínas es estructurar, es decir, formar y reparar el organismo. Forma parte de prácticamente todos nuestros tejidos y sistemas. Aunque las proteínas no suponen la fuente mayoritaria de aporte energético, constituyen un nutriente igual de importante que las grasas y los hidratos de carbono⁸.

Una vez evidenciado este dato es probable que quede en duda el interrogante de cuál es el aporte de proteína diario ideal. Pues bien, cuantificar la demanda obligatoria o el requerimiento mínimo de este macronutriente es una tarea bastante difícil porque no es una cantidad firme, estable, sino que varía en función de factores como dieta, composición corporal, peso, edad, sexo, estado hormonal y actividad física de la persona en cuestión⁹.

Un individuo normal sano requiere en torno a 0,8-1,0 gramos de proteína por kilogramo de peso y por día (g/kg/día). Ahora bien, una persona activa que tenga un mayor gasto energético puede necesitar entre 1,2 y 1,7 g/kg/día dependiendo del estrés muscular y de la cantidad de masa muscular, pudiendo en ciertos casos incrementarse hasta los 2,0 g/kg/día⁴.

El hecho de que una persona que realiza actividad física con regularidad tenga que tomar más proteína se debe a su mayor demanda de nitrógeno, la cual es causada a su vez por la mayor cantidad de masa muscular y el nivel de proteólisis muscular que tiene lugar en el ejercicio como consecuencia de la situación hormonal de ese momento^{4, 8}.

En el tiempo de recuperación después de hacer actividad física prevalecen procesos de síntesis, pero continúa la degradación de las proteínas utilizadas durante el ejercicio. Esto sucede por la acción de proteínas lisosomales o porque se filtran a la sangre, donde su concentración se ve incrementada en las horas posteriores⁴.

Por tanto, es este último acontecimiento una de las finalidades principales que conlleva la mayor ingesta proteica en los deportistas, es decir, el objetivo es compensar la pérdida de aminoácidos debido a la oxidación que sucede durante el ejercicio. Otra intención es favorecer la síntesis de proteínas con el fin de promover el desarrollo muscular o hipertrofia^{2, 4}.

Respecto a la intensidad de la actividad física, en ejercicios de resistencia ocurre que, cuando los recursos de glucógeno disminuyen, aumenta la oxidación de aminoácidos musculares y su liberación al torrente sanguíneo. Desde aquí van al hígado y la alanina (aminoácido no esencial) se transforman en piruvato, precursor de la glucosa por gluconeogénesis. Esta glucosa puede pasar a la sangre y ser captada por el músculo a través de la vía de la glucosa-alanina. Gracias a la misma los aminoácidos esenciales valen como posibles carburantes del músculo. Si la intensidad aumenta por encima del 55-70% del $VO_{2máx}$ se genera una mayor excreción urinaria de urea, que constituye el producto final del metabolismo de los aminoácidos. En suma, cuanto mayor es la intensidad del ejercicio más y antes disminuyen las reservas de glucógeno y aumenta la oxidación de proteínas^{2, 4, 8}.

Al contrario de lo que ocurre con las grasas y los hidratos de carbono, en el caso de las proteínas no se encuentran reservas en el cuerpo. Esto significa que el aporte adicional de proteínas en la dieta tiene como destino final ser eliminado, utilizado como fuente de energía o reciclado como elemento de otras moléculas, pasando incluso a formar parte de los depósitos de grasa en el tejido subcutáneo⁸.

El problema de una excesiva ingesta proteica que supere los niveles recomendados es el aumento en la producción de urea y otros solutos como ácidos no metabolizables. Este incremento es perjudicial para la salud, pues se requiere una mayor cantidad de agua para su excreción, lo que provoca acidosis y favorece la incorporación cálcica desde depósitos óseos, con efecto tampón y reducción en la reabsorción renal del calcio. Como término, se sobrecarga el hígado y el riñón por la producción y eliminación de estos compuestos^{2, 4, 8}.

Es muy usual ver a los fisicoculturistas, levantadores de peso y demás deportistas comprando y consumiendo proteínas y aminoácidos en forma de suplementos, es

decir, proteínas predigeridas para su ingesta en formato de bebidas, polvos o pastillas. Es relevante destacar que actualmente hay bastante controversia y discusión en razón a este consumo, tanto entre los expertos y profesionales del propio tema como entre los mismos usuarios. Si bien unos documentos afirman que simplemente supone una pérdida de dinero y que puede incluso llegar a ser desfavorable a la hora de lograr un cierto objetivo, otros manifiestan que una dosis de aminoácidos esenciales administrada antes del ejercicio incrementa la síntesis de proteínas musculares y provoca una mejor respuesta de absorción, no solo durante el ejercicio sino también después del mismo. Aunque se desaconseja su uso, es cierto que en situaciones determinadas pueden ser necesarios, considérese el caso de vegetarianos estrictos, personas convalecientes o sujetos que precisen llevar una dieta alta en calorías y no sean capaces de tomar la cantidad de comida pautada^{8, 10}.

7.1.2. Hidratos de carbono

Los carbohidratos, al igual que las proteínas, están integrados por unas unidades básicas llamadas monosacáridos o azúcares simples. A partir de la unión de estas moléculas se constituyen moléculas más complejas, disacáridos o azúcares simples dobles y polisacáridos o hidratos complejos, que acaban formando los hidratos de carbono. El monosacárido simple más importante es la glucosa o también conocido como *azúcar de la sangre*, que puede ser utilizada como fuente de energía, almacenada en el músculo e hígado, transformada en grasa para almacenar energía o usada para la síntesis de aminoácidos no esenciales. Los polisacáridos pueden dividirse en vegetales, entre los que se encuentran el almidón y la fibra, y animales, señalándose el glucógeno como forma más común. Este último destaca por ser el polisacárido de reserva más grande que existe en el músculo⁸.

Son tres las funciones más eminentes de los hidratos de carbono. La principal es la producción de energía procedente de la glucosa sanguínea de origen hepático y de la descomposición del glucógeno del músculo. Esta energía es la que posibilita la actividad muscular, es decir, el ejercicio físico. El consumo adecuado de carbohidratos durante el día sustenta los depósitos de glucógeno del organismo, pero

si la ingesta supera la capacidad de retener glucógeno por parte de las células, este exceso se transforma en grasa^{2, 4, 8}.

Otro cargo de los carbohidratos es servir como ahorradores de proteínas, puesto que si se reducen las reservas de glucógeno, se inicia la producción de glucosa mediante gluconeogénesis a partir de aminoácidos y triglicéridos con el fin de mantener unos niveles en sangre de la misma adecuados. Esto ocurre mayormente en situaciones de dieta restringida, entrenamientos intensos o ejercicio prolongado, siendo vital en estos casos ingerir un aporte de hidratos de carbono acorde a la circunstancia⁸.

En lo que respecta a la tercera función cabe decir que actúan como cebadores metabólicos. Esto se manifiesta cuando los subproductos que trascienden de su degradación favorecen el uso de las grasas como fuente de energía. Sin embargo, el cuerpo no es capaz de mantener un cierto nivel de energía aeróbica utilizando únicamente este sustrato, por lo que la capacidad máxima de ejercicio se reduce⁸.

Si se relaciona el ejercicio físico con los hidratos de carbono, se observa que su utilización como carburante depende de la duración e intensidad del esfuerzo, así como de la nutrición y el estado físico que presente el individuo.

Cuando la actividad física es de poca intensidad, en torno al 25% $VO_{2máx}$, la mayor parte de la energía necesaria para llevarla a cabo proviene de la oxidación de ácidos grasos, siendo muy bajo el aporte por parte de los sustratos musculares y la glucosa sanguínea⁴.

En los ejercicios que pasan a ser de intensidad moderada (aproximadamente al 65% $VO_{2máx}$) y van a realizarse durante un periodo de tiempo relativamente largo varía de forma ligera la contribución de los sustratos a la hora de proporcionar energía. Durante la transición del reposo al ejercicio submáximo la principal fuente de energía es el glucógeno muscular almacenado. En los 20-30 minutos posteriores el aporte de energía está repartido casi equitativamente entre el glucógeno muscular y hepático (50%) y las grasas (50%). En este momento el aporte de glucosa sanguínea es ínfimo. Cuando el ejercicio continúa, los depósitos de glucógeno existentes

empiezan a reducirse, por lo que la oxidación de grasas se vuelve más preeminente y la glucosa plasmática se convierte en el primordial surtidor de energía de carbohidratos. Llegados a este punto, si se prolonga aún más la actividad física, se produce la incapacidad por parte del hígado de suministrar glucosa, por lo que esta disminuye a nivel sanguíneo ocasionando hipoglucemia. Finalmente, a pesar de disponer de suficiente oxígeno y de que la energía potencial de las grasas sea prácticamente ilimitada, aparece la fatiga muscular^{2, 4, 8}.

Por último, si se trata de una actividad física de alta intensidad (alrededor del 85% $VO_{2m\acute{a}x}$) se evidencia que en los primeros minutos el principal combustible de energía es el glucógeno muscular y la glucosa plasmática, la cual al ser captada de manera rápida por el músculo aumenta bruscamente y se mantiene alta. Esto se debe a que el aporte de oxígeno no logra cubrir las necesidades del metabolismo aeróbico y a que los hidratos de carbono son el único macronutriente capaz de generar energía sin oxígeno. Una vez pasados los 40 minutos iniciales se observa que la cantidad de glucosa captada por parte del músculo es de 7 a 20 veces mayor si se compara con la de reposo^{4, 8}.

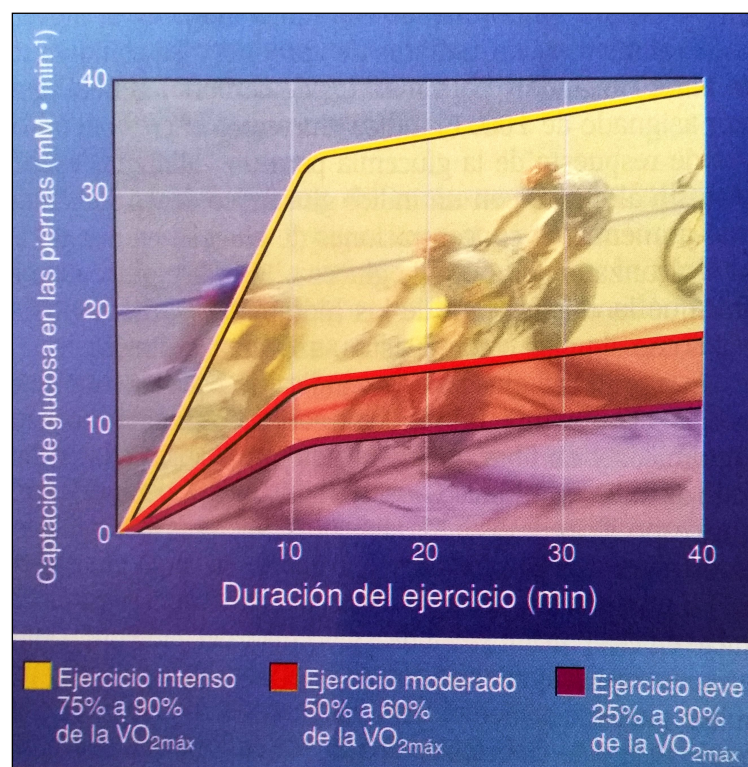


Fig. 4. Respuesta generalizada de la captación de la glucosa sanguínea en los músculos en relación con la duración e intensidad del ejercicio ($VO_{2m\acute{a}x}$)⁸.

En suma, como se evidencia en la 4ª edición del libro de Katch, McArdle y Katch *Fisiología del Ejercicio. Fundamentos*:

“La ventaja del glucógeno es que brinda energía para el ejercicio el doble de rápido que las grasas y las proteínas⁸.”

7.1.3. Grasas

Aunque comúnmente a los lípidos se los llaman grasas, hay que recalcar que no es del todo correcto, puesto que en realidad las grasas constituyen un subtipo. Como se explica al principio de cada nutriente, en el caso de los lípidos las unidades básicas son los ácidos grasos. Estos se clasifican en tres grupos en función del grado de insaturación, diferenciándose así ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. El mayor porcentaje de lípidos se encuentra en forma de triglicéridos, moléculas compuestas por tres ácidos grasos y glicerol que tienden a acumularse en el músculo y en el tejido adiposo y que son capaces de producir una gran cantidad de energía^{2, 8, 9}.

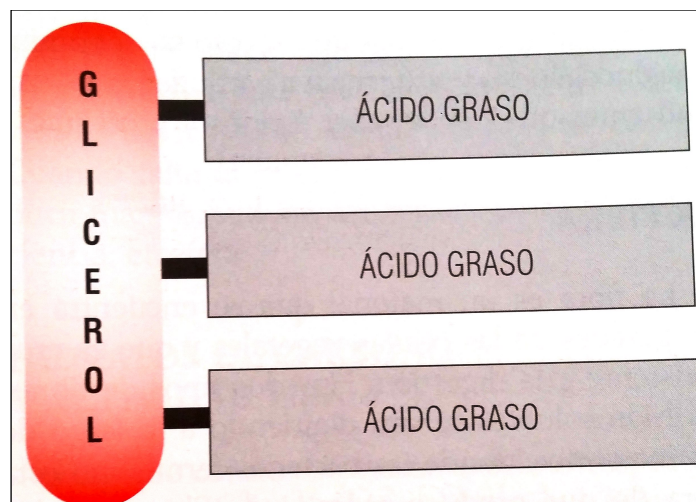


Fig. 5. Estructura esquemática de un triglicérido².

En lo que corresponde a las funciones cabe decir que desempeñan papeles muy importantes: constituyen una sustancial reserva de energía, permiten el aislamiento térmico para mantener una temperatura corporal adecuada, protegen órganos vitales, forman las membranas celulares y algunos tipos de hormonas, sirven como medio de transporte de vitaminas y disminuyen el apetito⁸.

Se trata de un sustrato energético listo para utilizar, por lo que es el combustible celular ideal, concretamente las grasas aportan entre el 80% y 90% de la energía que necesita el cuerpo. Además, al igual que ocurre con los hidratos de carbono, las grasas también actúan como ahorradores de proteínas con la finalidad de que sinteticen y reparen los tejidos⁸.

La contribución de las grasas en el ejercicio se ha descrito anteriormente junto con la de los carbohidratos. Pero no está de más aclarar que depende de dos agentes, de la liberación del ácido graso que compone la molécula de los triglicéridos en los depósitos de grasa y del transporte hasta el tejido muscular, el cual se lleva a cabo a través de la sangre gracias a su unión con la principal proteína sanguínea, la albúmina^{8,9}.

Los triglicéridos que se encuentran en el tejido muscular contribuyen de igual modo en el aporte energético, fundamentalmente cuando las reservas de glucógeno van disminuyendo. Por tanto, se reafirma que:

“Cuando el cuerpo depende del catabolismo de las grasas (es decir, al disminuir las reservas de hidratos de carbono), la intensidad del ejercicio disminuye a un nivel que depende de la capacidad del cuerpo de movilizar y oxidar las grasas⁸.”

Es habitual que la gente que quiere o está acostumbrada a cuidarse o llevar un estilo de vida saludable se asuste cuando se comenta que es imprescindible consumir y tener un cierto porcentaje de grasa. Pero está comprobado que niveles bajos de grasa pueden causar problemas de salud, los cuales están directamente relacionados con las funciones expresadas anteriormente^{2,9}.

Por ejemplo, existe la posibilidad de que aparezcan anomalías en el ciclo menstrual de las mujeres que hacen dietas “libres de grasas”, como la amenorrea. También pueden surgir deficiencias vitamínicas, ya que liposolubles (A, D, E y K) que han de ser transportadas hasta su lugar de acción por los lípidos. Ahora bien, hay que tener en cuenta y es importante saber que las grasas consumidas en la dieta han

de ser preferiblemente de origen insaturado, pues hay evidencias de que un alto nivel de ácidos grasos saturados se relaciona con enfermedades vasculares obstructivas².

7.2. Micronutrientes

Los micronutrientes son las vitaminas y los minerales y se definen como aquellas sustancias químicas que, ingeridas en pequeñas cantidades, regulan los procesos metabólicos, facilitando la transferencia de energía y la síntesis de tejidos^{2, 8}.

7.2.1. Vitaminas

Son sustancias orgánicas esenciales para llevar a cabo funciones y reacciones metabólicas específicas con normalidad. Aunque no son unidades básicas de otros compuestos, no contribuyen a la masa corporal y no valen como fuente de energía. Un aporte inadecuado de las mismas puede llevar a complicaciones médicas y síntomas de exceso o deficiencia vitamínica^{2, 8}.

Se han descubierto 13 vitaminas, las cuales se han clasificado en dos grupos. En primer lugar se encuentran las liposolubles, es decir, las vitaminas solubles en lípidos que pueden almacenarse en el tejido adiposo del cuerpo. Debido a esto se pueden dar en condiciones extremas casos de hipervitaminosis, o por el contrario, de hipovitaminosis, como consecuencia por ejemplo de una dieta baja en grasas. Por otro lado están las hidrosolubles, las cuales son solubles en agua y participan en reacciones de formación de tejidos y obtención de energía a partir de los macronutrientes. Actúan como coenzimas en reacciones generadoras de energía, por lo que son esenciales en individuos deportistas. En este caso, no pueden almacenarse en el organismo, siendo su vida media muy corta^{2, 8}.

Las vitaminas intervienen de manera repetida en reacciones metabólicas sea cual sea el nivel de actividad física. Esto refleja que los requerimientos vitamínicos deberían ser los mismos en personas sedentarias y activas. Sin embargo, al igual que ocurría con las proteínas, el auge que está consiguiendo el sector dedicado a la suplementación deportiva hace que los niveles de vitaminas se vean aumentados en los individuos que realizan actividad física. Las evidencias no apoyan el consumo de dichos suplementos por parte de personas que siguen dietas adecuadas y saludables⁸.

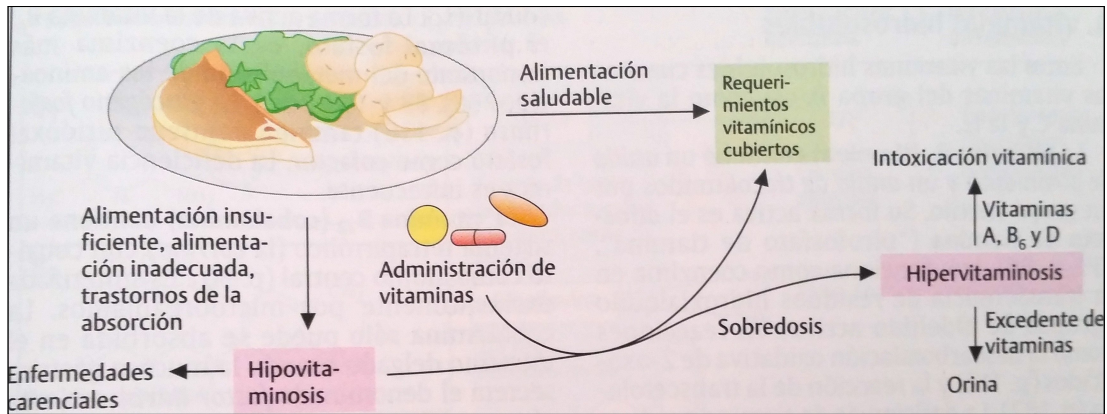


Fig. 6. Soporte vitamínico⁷.

7.2.2. Minerales

Se trata de 22 elementos metálicos que conforman parte de vitaminas, hormonas y enzimas. Estos pueden unirse a otras sustancias químicas o permanecer en forma libre. Del mismo modo que las vitaminas, un exceso o un defecto de minerales no contribuye a la función fisiológica y puede producir efectos tóxicos⁸.

Se distinguen minerales oligoelementos y minerales macroelementos, los cuales están presentes en procesos celulares anabólicos y catabólicos. Debido a esto son esenciales tanto para personas sedentarias como para deportistas, ya que gracias a su participación se sintetizan nutrientes biológicos, se libera energía en la degradación de los macronutrientes, se estructuran los huesos y los dientes, se mantiene el equilibrio ácido-base, el ritmo cardíaco y la contractilidad muscular, etc^{2, 8}.

CONCLUSIÓN

La contracción muscular que permite el movimiento tiene lugar gracias al mecanismo de deslizamiento de los filamentos delgados sobre los gruesos, principales componentes de la unidad básica del músculo esquelético.

La existencia de tres sistemas de energía posibilitan el combustible necesario para realizar actividad física. En función de la intensidad y duración del ejercicio se emplea uno u otro, pues cada uno de ellos precisa de una condición de oxígeno y de unos sustratos determinados.

Se estima que las consecuencias metabólicas de las reacciones bioquímicas que suceden en los músculos son las responsables de la mayor resistencia y consumo de oxígeno y menor producción de lactato en individuos entrenados.

El porcentaje de fibras tipo I y II también obedece al nivel de entrenamiento y modalidad deportiva, pero no se ha demostrado que las fibras I se transformen en fibras II, ni viceversa.

Se observa que las hormonas cumplen un rol importante en el metabolismo del tejido muscular, desarrollando multitud de funciones: regular la utilización de los sustratos de energía, su captación muscular y su liberación hepática, etc.

Los macronutrientes son vitales tanto para personas entrenadas como no entrenadas, juegan un papel sustancial como sustratos energéticos y han de ser ingeridos en la proporción adecuada a fin de que no aparezcan alteraciones fisiológicas. Mientras que los hidratos de carbono y los lípidos son los principales surtidores de energía a la hora de hacer ejercicio, las proteínas desempeñan un cometido fundamental en la reparación del organismo. No obstante, éstas igualmente actúan como fuente de energía secundaria.

Por su parte, los micronutrientes son sustancias esenciales encargadas de regular los procesos metabólicos, favoreciendo la transferencia de energía y la síntesis de tejidos.

Se encuentra un gran debate en el negocio de la suplementación deportiva. No se aclaran los efectos o resultados que puede generar a nivel muscular, ni si llegan a ser beneficiosos o perjudiciales.

La trayectoria de los estudios sobre el metabolismo muscular es larga y compleja y aún no se ha resuelto en su totalidad. Queda reflejada, por tanto, la necesidad de continuar indagando en cómo todos estos factores contribuyen y afectan al mismo. La información plasmada sirve como base para un entendimiento general e inicial del metabolismo muscular, por lo que se abre camino a investigaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Subdirección General de Estadística y Estudios, Secretaría General Técnica, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Encuesta de Hábitos Deportivos en España 2015/Síntesis de resultados. España: SECRETARÍA NACIONAL TÉCNICA Subdirección General de Documentación y Publicaciones; 2015.
2. Merí À. Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte. 1ª ed. Madrid: Panamericana; 2005.
3. González de Buitrago Arriero JM. Fundamentos de bioquímica. 1ª ed. Barcelona: Doyma; 1994.
4. Mataix Verdú J. Tratado de nutrición y alimentación. Volumen II. Nueva ed. ampliada. Barcelona: Oceano/ergon.
5. López Chicharro J, Vicente Campos D, Cancino López J. Fisiología del Entrenamiento Aeróbico. Una visión integrada. 1ª ed. Madrid: Panamericana; 2013.
6. Holloszy J, Coyle E. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. - PubMed - NCBI [Internet]. Ncbi.nlm.nih.gov. 2017 [cited 10 June 2017]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6373687>
7. Koolman J, Röhm KH. Bioquímica Humana. Texto y Atlas. 4ª ed. Madrid: Panamericana; 2012.
8. Katch V, McArdle W, Katch F. Fisiología del Ejercicio. Fundamentos. 4ª ed. Madrid: Panamericana; 2015.
9. Battaner Arias E. Introducción a la Bioquímica, 3. Parte 3ª: Metabolismo. 1ª ed. España: Hispana; 2013.
10. Wolfe R. Skeletal muscle protein metabolism and resistance exercise. - PubMed - NCBI [Internet]. Ncbi.nlm.nih.gov. 2017 [cited 10 June 2017]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16424140>