

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fisioterapia

**Factores determinantes en el
rendimiento del corredor de maratón.
Revisión bibliográfica.**

**Determinant factors in the
performance of the marathon runner.
A bibliographic review.**

**Philip Semper Haber
Tomas Van Haaren Beun**

Tutor/a: Carmen Rosa Rodríguez Ferrer

Curso 2017-2018- Convocatoria Julio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fisioterapia

**Factores determinantes en el
rendimiento del corredor de maratón.
Revisión bibliográfica.**

**Determinant factors in the
performance of the marathon runner.
A bibliographic review.**

**Philip Semper Haber
Tomas Van Haaren Beun**

Tutor/a: Carmen Rosa Rodríguez Ferrer

Curso 2017-2018- Convocatoria Julio

AUTORIZACIÓN DEL TUTOR



Grado en Fisioterapia

Asignatura: Trabajo de Fin de Grado



Centro: Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de La Laguna

Titulación: Grado en Fisioterapia

DATOS ALUMNO/A:

Apellidos: Van Haaren Beun **Nombre:** Tomas
DNI/Pasaporte: 46298768-K **Dirección:** Calle Andorra nº1 **C.P.** 38650
Localidad: Arona **Provincia:** Santa Cruz de Tenerife
Teléfono: 699521969 **Email:** alu0100889932@ull.edu.es

DATOS ALUMNO/A:

Apellidos: Semper Haber **Nombre:** Philip
DNI/Pasaporte: 72811045-Z **Dirección:** C/ Galicia, Urb. Roque del Conde 3C **C.P.** 38660
Localidad: Adeje **Provincia:** Santa Cruz de Tenerife
Teléfono: 662656511 **Email:** alu0100902419@ull.edu.es

TÍTULO TRABAJO DE FIN DE GRADO

Factores determinantes en el rendimiento del corredor de maratón. Revisión bibliográfica.

LOS/LAS TUTORES:

Apellidos: Rodríguez Ferrer **Nombre:** Carmen Rosa

AUTORIZACIÓN DE LOS TUTORES

Dña Carmen Rosa Rodríguez Ferrer, Profesora del Departamento de Bioquímica, Microbiología, Biología Celular y Genética de la Universidad de La Laguna.

AUTORIZA A D. Tomas Van Haaren Beun y D. Philip Semper Haber a presentar la propuesta de TRABAJO DE FIN DE GRADO, que será defendido en la convocatoria oficial de Julio.

La laguna, a 2 de Julio de 2018.

Firmado: Dña Carmen R. Rguez. Ferrer

SR./SRA. PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Resumen

Introducción: Durante los últimos años se ha producido un “boom” en las carreras de a pie a nivel mundial, entre ellas se encuentra la maratón, cuya práctica, ya sea a nivel profesional o por afición, ha aumentado considerablemente. Existe un abanico muy amplio en cuanto al rendimiento mostrado por los distintos corredores, esto es debido a ciertos factores que analizaremos en esta revisión.

Objetivo: Reunir datos concluyentes con respecto al rendimiento deportivo, asociado a la mejora de las marcas en corredores de maratón y establecer cuáles son los factores que determinan la superioridad de los corredores de élite.

Material y métodos: Se seleccionaron tras una búsqueda bibliográfica teniendo en cuenta criterios de exclusión e inclusión artículos basados en la evidencia desde el año 2010 hasta el año 2018 en las bases de datos PUBMED, Hindawi, Taylor and Francis Online, Mdpi, Journal of Applied Physiology, PLOS ONE y Springer Link.

Resultados y discusión: La nutrición, el entrenamiento y la recuperación muestran tener una gran importancia en las marcas del corredor de maratón. Existen diferencias entre los corredores de élite y otros corredores en cuanto a la capacidad aeróbica, medidas antropométricas y años de experiencia, aunque se precisa de un mayor estudio de por qué existe una prevalencia de corredores de élite kenianos y etíopes. Además, existen otros aspectos determinantes como pueden ser la raza, sexo, edad y el patrón de pisada.

Conclusión: Son múltiples los campos que determinan el rendimiento de un corredor de maratón, dentro de cada uno de ellos existen evidencias contrastadas que parecen servir como guía para aquellas personas que decidan adentrarse en esta disciplina o aquellos corredores de maratón que deseen mejorar su rendimiento, en cambio, existen algunos parámetros que precisan de un mayor estudio ya sea para corroborar otros análisis o ampliar el conocimiento de estos.

Palabras clave: “Maratón”, “Rendimiento”, “Corredores de élite”, “Metabolismo”, “Entrenamiento”, “Nutrición”, “Larga Distancia”.

Abstract

Background: During recent years there has been a "boom" in foot races worldwide, including the marathon, whose practice, either professionally or by hobby, has increased considerably. There is a wide range in terms of the performance shown by the different runners, this is due to certain factors that we will analyze in this review.

Objective: Gather conclusive data regarding sports performance, associated with the improvement of marks in marathon runners and establish which factors determine the superiority of elite runners.

Material and Methods: Were selected after a bibliographic search taking into account exclusion and inclusion criteria articles based on the evidence from 2010 to 2018 in the databases *PUBMED*, *Hindawi*, *Taylor and Francis Online*, *Mdpi*, *Journal of Applied Physiology*, *PLOS ONE* and *Springer Link*.

Results and discussion: Nutrition, training and recovery show great importance in the marathon runner's marks. There are differences between elite runners and other runners in terms of aerobic capacity, anthropometric measures and years of experience, although a greater study of why there is a prevalence of Kenyan and Ethiopian elite marathon runners is needed. Besides, there are other determining factors such as race, sex, age and footfall.

Conclusion: There are multiple fields that determine the performance of a marathon runner, within each of them there are proven evidences that seem to serve as a guide for those people who decide to enter this discipline or those marathon runners who wish to improve their performance, on the other hand, there are some parameters that require further study either to corroborate other analyzes or to expand their knowledge.

Key words: "Marathon", "Performance", "Elite Runners", "Metabolism", "Training", "Nutrition", "Long Distance".

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Historia de la maratón	1
1.2. Reacciones fisiológicas al ejercicio	2
1.3. Factores que condicionan el rendimiento del maratón	3
1.4. Tejido muscular	4
1.5. Musculatura principal que interviene en la maratón	5
1.6. Bioenergética	6
1.7. Metabolismo energético	7
1.7.1. Vía oxidativa aeróbica	7
1.7.2. Rutas importantes para la maratón	9
1.8. Entrenamiento aeróbico	10
1.9. Fatiga	12
1.9.1. Nutrición	13
1.9.2. Hidratación	16
1.9.3. Equilibrio ácido-base	17
1.10. Labor del fisioterapeuta en carreras de larga distancia	18
2. OBJETIVOS	21
3. MATERIAL Y MÉTODOS	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5. CONCLUSIONES	40
6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	41
7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	42
8. BIBLIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCIÓN

La práctica de ejercicio físico ha ido en aumento a nivel mundial durante la última década. El ‘boom’ de las carreras a pie es uno de los claros ejemplos; ya sea por salud, diversión o estética ha provocado que cada día más personas se unan a este deporte. Una modalidad de competición ya sea a nivel olímpico o por afición, es la carrera de maratón, una prueba de resistencia de participación multitudinaria que se celebra en condiciones ambientales y temperaturas variables.

En España, la práctica deportiva de la carrera a pie es la quinta actividad física más practicada. Del total de personas que realizan algún tipo de actividad física, el 22,6% afirma que practica este tipo de entrenamiento. Además, el número de carreras populares ha ido en aumento, hay cerca de 3000 carreras que se realizan año tras año por todo el país. En este tipo de carreras participan desde los mejores atletas del país hasta corredores recreacionales, por ello hay un abanico muy amplio en cuanto al rendimiento mostrado por los distintos corredores. Esto ha llevado a un interés por estudiar los factores que afectan a su rendimiento, que analizaremos en esta revisión ⁽¹⁾.

1.1. HISTORIA DE LA MARATÓN

La maratón es una carrera de larga distancia, en la cual se recorre una distancia de 42.195 metros. Desde los juegos de Atenas de 1896, forma parte del programa de la rama de atletismo de los Juegos Olímpicos ⁽²⁾.

La carrera tuvo su origen en una serie de relatos de la batalla de Maratón, que se produjo en 490 a. C. En esa disputa los griegos derrotaron a los persas. El historiador Heródoto habla de la hazaña de Filípides, que recorrió el camino desde Atenas hasta Esparta (213 km) para avisar a los espartanos del desembarco persa, y así solicitar refuerzos ⁽³⁾. Por esta razón, la longitud de la maratón se inspiró en esta gesta, aunque esta distancia es menor y fue establecida por la reina de Inglaterra en los Juegos Olímpicos de Londres de 1908 ⁽²⁾. Desde su inicio las maratones eran exclusivamente para el sexo masculino. La inclusión de las carreras femeninas comenzó en la década de 1970, y fue introducida por primera vez en los Juegos Olímpicos de los Ángeles de 1984 ⁽²⁾.

En cuanto a las marcas de la maratón, son el principal objetivo de los deportistas que participan en estas carreras. La mejora constante en el rendimiento del atleta ha sido infundada por diferentes razones, como pueden ser la introducción del entrenamiento de

alto volumen durante todo un año en la década de los 50 (después de la Segunda Guerra Mundial) o las oportunidades competitivas que permitieron a los mejores atletas ganarse la vida desde 1980. En la siguiente gráfica se muestra la evolución constante de los tiempos, así como la posible mejora que puede darse según el promedio de mejora que se lleva teniendo a lo largo de los años ⁽⁴⁾.

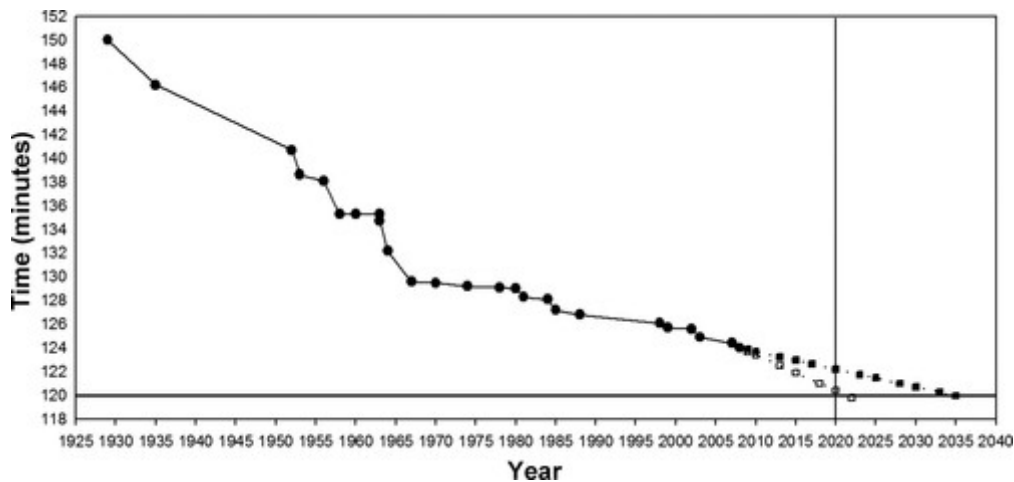


Figura 1. La progresión de los tiempos récord mundiales en el maratón desde finales de 1920 y las mejoras proyectadas. ⁽⁴⁾

La primera mejor marca oficial fue de 2h58m50s por el griego Spiridon Louis, en los Juegos Olímpicos de Atenas de 1896 ⁽⁵⁾. Desde este inicio, se han ido superando las marcas a lo largo de los años hasta el año 2014, en el cual el keniano Dennis Kimetto fijó la marca en 2h02m57s en la Maratón de Berlín ⁽⁶⁾. Hoy en día nadie ha conseguido superar ese último récord, por lo que el entorno que gira alrededor de la competición se pregunta: ¿Es posible correr los 42,195 km en menos de 2 horas? Y es que, si miramos años atrás, se ha conseguido bajar la marca más de 50 minutos, por lo que se cree que esto puede ser posible teniendo en cuenta varios factores que se enumeran a continuación.

1.2. REACCIONES FISIOLÓGICAS AL EJERCICIO

Cuando se empieza el estudio de la fisiología del esfuerzo de un deporte, tal como es correr, se valora en un ambiente controlado para ver cómo responde el cuerpo. Esto se conoce como reacción aguda. Así, se pueden entender mejor las adaptaciones crónicas, que son los cambios producidos tras meses de entrenamiento, lo cual lleva a una mejora del rendimiento. Pero ni el deportista altamente entrenado ni la persona que corre como aficionado llevan a cabo sus carreras en ambientes que permitan un amplio control fisiológico ⁽⁷⁾.

Las condiciones bajo las que se examina a los participantes en las investigaciones son bajo un estricto control. Los factores ambientales tales como la temperatura, la humedad, la altitud, la luz, el ruido, así como otros factores extrínsecos a estos, pueden influir en la intensidad de la reacción de todos los sistemas fisiológicos básicos (como puede ser el VO₂, la frecuencia cardíaca...). Por ello, existen varios condicionantes a la hora de conseguir un rendimiento óptimo en una carrera de larga distancia como es la maratón ⁽⁷⁾.

1.3. FACTORES QUE CONDICIONAN EL RENDIMIENTO EN LA MARATÓN

Como nombramos anteriormente, existe una serie de factores que juegan un papel fundamental a la hora de realizar la maratón o cualquier carrera de larga distancia. En el presente trabajo nos centraremos en los componentes fisiológicos, de entrenamiento y biomecánicos. Si es cierto, que lo factores ambientales también tienen un papel fundamental en el rendimiento, ya que están ligados con las condiciones climatológicas e incluso la localización geográfica de determinadas competiciones. Además, estos afectan directamente sobre los factores fisiológicos como pueden ser: el VO₂, el umbral ventilatorio, la economía de carrera y la fatiga ⁽¹⁾. Los factores fisiológicos se irán comentando según avance la introducción. En la siguiente tabla, observamos ciertas variables que condicionan el rendimiento de este deporte:

Factores que condicionan el rendimiento en la carrera de maratón			
1) Ambientales:	2) Entrenamiento:	3) Fisiológicos:	4) Biomecánicos:
<ul style="list-style-type: none"> a. Temperatura b. Humedad c. Viento d. Altitud e. Pendiente 	<ul style="list-style-type: none"> a. Resistencia b. Fuerza 	<ul style="list-style-type: none"> a. VO₂máx b. Umbral ventilatorio c. Economía de carrera d. Fatiga e. Edad f. Género g. Tipos de fibras h. Raza 	<ul style="list-style-type: none"> a. Antropometría b. Patrón de pisada c. Flexibilidad

Tabla 1. Elaboración propia.

Este conjunto condiciona de manera directa al rendimiento de un corredor. Por ello, teóricamente, aquel individuo que corra en condiciones ambientales favorables, cuyo entrenamiento sea el idóneo y constante, presente unos parámetros fisiológicos óptimos y tenga una biomecánica ideal, será el que pueda batir la actual marca mundial.

1.4. TEJIDO MUSCULAR

El músculo esquelético es un tejido que produce energía mecánica a través de energía química mediante el ATP y presenta una estructura compleja. Está rodeado por el epimisio (la capa más externa) que mantiene unido todos los fascículos que lo conforman, los cuales están unidos, a su vez, internamente por el perimisio. Una vez incidimos en el perimisio nos encontraríamos con las fibras musculares, que son las células musculares individuales o miocitos, las cuales se encuentran rodeadas por el endomisio. En el tejido muscular se diferencian tres tipos de fibras musculares, cada una de las cuales tiene tendencia a utilizar un determinado sistema energético, como vemos en el libro de Fisiología del Esfuerzo y del Deporte ⁽⁷⁾.

- **Fibras tipo I (CL).** Denominadas también fibras rojas de contracción lenta. Las fibras tipo I utilizan mayoritariamente el sistema aeróbico para conseguir energía. Presentan más mitocondrias (por ende, más enzimas mitocondriales), imprescindibles para la respiración celular, lo que permite proporcionar mayor energía aeróbica.
- **Fibras tipo IIa (CRa).** Reciben el nombre de fibras rojas de contracción rápida. Emplean tanto el sistema aeróbico como el anaeróbico, disponiendo así de capacidad glucolítica anaeróbica correspondiente al sistema del ácido láctico.
- **Fibras tipo IIb (CRb).** 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.

Para las carreras de larga distancia son de vital importancia las fibras tipo I, puesto que tienen una mayor capacidad de oxidar piruvato y ácidos grasos. Al tener almacenadas gran cantidad de triglicéridos y glucógeno, utilizan los ácidos grasos como principal fuente de combustible. De igual modo, se observan valores más elevados de mioglobina en estas fibras, la cual es responsable del almacenamiento de O₂ en el músculo para su disponibilidad en condiciones aeróbicas. La distribución de los tipos de fibra varía como resultado del entrenamiento físico y se han estudiado las diferencias existentes entre las distintas modalidades deportivas. En el caso de los corredores de resistencia, presentan un 75% de fibras tipo I, un 25% de fibras tipo IIa y un porcentaje pequeño o nulo de fibras tipo IIb. Por ejemplo, se ha analizado que en las extremidades inferiores de los corredores profesionales (específicamente el músculo gastrocnemio), el porcentaje de fibras tipo I

llega hasta el 90%, pudiendo llegar a valores del 93-99% en campeones mundiales de maratón ⁽⁸⁾.

Si se relaciona la información presentada con el entrenamiento 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 con respecto a las fibras rápidas.” ⁽⁹⁾ Por ello los maratonianos tienen un mayor porcentaje de fibras lentas, en comparación con otro tipo de deportistas, de esta forma tardan más en fatigarse a la hora de realizar dicha modalidad deportiva.

1.5. MUSCULATURA QUE INTERVIENE EN LA MARATÓN

El tren inferior del cuerpo es de gran importancia durante la carrera de maratón ya que la musculatura de la pierna tiene que amortiguar la caída del peso sobre el apoyo. Resulta además de gran relevancia la función del tendón de Aquiles, pues se encuentra en continua tensión durante la carrera de maratón. Es por ello que muchos corredores principiantes tienden a correr sobre las puntas de los pies, lo que limita la acción impulsiva del tobillo y del pie ⁽¹⁰⁾.

En cuanto a los músculos principales que se ven involucrados en la carrera de larga distancia, se va a dividir por fases según el movimiento ⁽⁷⁾:

- 1. La tracción** (movimiento con el que trasladamos el peso del cuerpo de detrás hacia delante del apoyo). Los glúteos, isquiotibiales, gemelos y flexores de la planta del pie son los encargados de que el movimiento se lleve a cabo de manera correcta. Además, para la tracción resulta de vital importancia el agarre a la superficie, es por ello, que muchos corredores optan por el calzado con clavos.
- 2. El impulso** (con el peso por delante del apoyo, podemos impulsarnos hacia delante empujando el suelo hacia atrás.). El impulso nace desde la cadera, provocando la contracción de los músculos de manera descendente desde glúteo, isquiotibiales, psoas, cuádriceps, gemelos, finalizando con el impulso provocado por los flexores de los dedos.
- 3. El vuelo** (aquí incluimos todas las acciones que se producen cuando el pie se encuentra en el aire, cuyo objetivo es que la zancada sea lo más larga posible

intentando alcanzar el suelo lo más rápido posible). Cuentan como potenciadores del movimiento los músculos flexores de cadera (psoas iliaco), flexores de rodilla (isquiotibiales) y flexores de tobillo (músculo tibiales).

4. **La elevación de la pierna libre** (es el movimiento de elevar la rodilla que no se encuentra apoyada en el suelo, para potenciar el apoyo que hacemos con la pierna de apoyo). Para este movimiento contamos con los flexores de cadera, de rodilla y de tobillo (este último tiende a ir flexionado para mantener un mejor tono muscular en la pierna). Además, durante esta fase es importante la función de los músculos aductores.
5. **El descenso de la pierna libre** (movimiento mediante el cual el pie busca el suelo hacia atrás y hacia abajo, para así enlazar con el apoyo y terminar el círculo de movimientos)

1.6. BIOENERGÉTICA

La bioenergética es el estudio de los diferentes procesos químicos que tienen lugar dentro de la célula para producir energía. Esta energía proviene de las moléculas combustibles consumidas en la dieta (nutrientes) o sintetizadas en el organismo (carbohidratos, ácidos grasos o proteínas). Por ello, un correcto planteamiento de estrategias nutricionales da la posibilidad de optimizar el rendimiento del ejercicio. La energía producida durante el catabolismo en forma de ATP se utiliza en las reacciones anabólicas de biosíntesis, en el movimiento o en la señalización celular ⁽⁷⁾.

El ATP se genera mediante tres sistemas energéticos ⁽⁷⁾:

- El sistema ATP-PC, mediante el cual el fosfato inorgánico (Pi) es separado de la fosfocreatina (por la enzima creatincinasa). El Pi se combina con el ADP y forma ATP. Se trata de un sistema anaeróbico, generado sin la participación de oxígeno molecular. Se produce 1 mol de ATP por 1 mol de PC (fosfocreatina).
- El sistema glucolítico, en el cual, a través de la glucólisis, la glucosa citosólica o la derivada del glucógeno, se degrada hasta ácido pirúvico. Sin oxígeno éste se convierte en ácido láctico (un mol de glucosa citosólica produce 2 moles de ATP y uno procedente de glucógeno).
- El sistema oxidativo es el de mayor importancia para los corredores de maratón. A través de este sistema, que utiliza el poder oxidativo del oxígeno molecular, se

genera gran cantidad de energía en el interior de las mitocondrias, mediante un proceso denominado respiración celular (ciclo de Krebs, cadena de transporte electrónico y fosforilación oxidativa). Debido a que el ATP no se acumula en los tejidos y a la alta demanda de este durante un ejercicio de resistencia, los músculos necesitan un aporte constante de energía durante las actividades de larga duración y, por tanto, dependen del suministro constante de combustibles y el desarrollo continuo de la respiración celular. Este se puede conseguir mediante la oxidación de los hidratos de carbono o las grasas (también las proteínas, pero en menor medida).

- La producción oxidativa de los hidratos de carbono abarca los procesos de la glucólisis, el ciclo de krebs y la cadena de transporte de electrones. Este sistema genera un total de 31 moléculas de ATP netas (30 si se inicia con glucosa citosólica), además de H₂O y CO₂.
- La producción oxidativa de las grasas abarca los procesos de lipólisis, betaoxidación, ciclo de Krebs, cadena de transporte de electrones y fosforilación oxidativa. Estos procesos producen un total de 106 moléculas de ATP netas.

La capacidad oxidativa de los músculos depende de la cantidad de enzimas oxidativas, de sus tipos de fibra y de la disponibilidad de oxígeno.

1.7. METABOLISMO ENERGÉTICO

1.7.1. VÍA OXIDATIVA AERÓBICA

La vía oxidativa aeróbica engloba el catabolismo de carbohidratos y lípidos (y proteínas en condiciones especiales) en presencia de oxígeno. Esta ruta es de vital importancia para los corredores de larga distancia debido a que es su principal fuente de energía durante las pruebas de resistencia ⁽¹¹⁾.

Dentro del catabolismo aeróbico tenemos dos tipos de fuentes metabólicas, cuya mejora está relacionada con el entrenamiento ⁽¹¹⁾:

- Glucólisis aeróbica: es el proceso completo de oxidación de una molécula de glucosa. En esta ruta se sintetiza todo el ATP posible a partir de la glucosa. Los piruvatos obtenidos a partir de la glucosa tienen dos destinos principales: la fermentación láctica o la vía aeróbica.

- **Lipólisis:** es la degradación de los lípidos saponificables para que las cadenas carbonadas o ácidos grasos resultantes provean de energía al músculo durante el ejercicio. Una vez estos entran en la matriz mitocondrial, se inicia la B-oxidación.

Tanto el piruvato proveniente de la glucólisis como el de los ácidos grasos, terminará creando un compuesto denominado Acetil-CoA, con el cual comienza lo que se conoce como respiración celular, que tiene lugar dentro de la mitocondria. Este proceso está constituido por varias reacciones químicas separadas en dos rutas: el ciclo de Krebs (también denominado ciclo del ácido cítrico) y la fosforilación oxidativa, con las cuales termina el proceso de obtención de energía en condiciones aeróbicas.

Tanto los lípidos como los carbohidratos se utilizan para aportar energía al músculo durante las carreras de fondo, ya que el corredor completa prácticamente la totalidad de la prueba haciendo uso únicamente de vías aeróbicas. El empleo de uno u de otro depende de la intensidad del ejercicio, su duración, el nivel de entrenamiento aeróbico, la disponibilidad de sustratos, la actividad de las enzimas reguladoras, sus hábitos dietéticos, la ingesta de hidratos de carbono antes y durante el ejercicio, la edad y el sexo.

Para valorar la intensidad con la que un deportista de larga distancia se emplea el % de volumen de oxígeno que es empleado por las vías aeróbicas para formar ATP. Si se sobrepasa el 100% de $VO_{2máx}$, significará que se está alcanzando una velocidad en la que la vía aeróbica no puede seguir el ritmo para formar el ATP necesario para mantener la actividad muscular. Esto se denomina *umbral anaeróbico*. Por tanto, si este se consigue mejorar, sus marcas se verán favorecidas debido a que puede aumentar la velocidad sin necesidad de abandonar el catabolismo aeróbico ⁽⁷⁾.

De no ser así, aumentarían los niveles de lactato por culpa de un aumento en el uso de la glucólisis anaeróbica láctica, que llevaría al agotamiento de las reservas de glucógeno, y la imposibilidad de utilizar los lípidos. La síntesis de energía a partir de las grasas sólo puede proveer ATP a intensidades entre el 55-75% del $VO_{2máx}$, lo cual depende del entrenamiento aeróbico del individuo. El metabolismo oxidativo de HC permite intensidades del 100%. Los HC suponen una fuente de obtención de energía más rápido que los lípidos, al ser de menor tamaño ⁽⁷⁾.

Por tanto, la cantidad de ATP sintetizado a partir de una molécula de glucosa es diferente según el tipo de ruta metabólica que se emplee. La productividad de la glucosa se desglosa en ⁽¹¹⁾:

- Glucólisis anaeróbica: 2 ATP por cada glucosa.
- Oxidación aeróbica completa: 32-33 ATP por cada glucosa (dependiendo de si se produce en el músculo o en el hígado, respectivamente). De esta forma, la vía oxidativa aeróbica, aunque sea un proceso más lento que la ruta anaeróbica láctica, supone una mayor fuente de ATP en comparación.

1.7.2. RUTAS IMPORTANTES DURANTE LA MARATÓN.

Cabe destacar la importancia del ciclo de Cori, que permite que haya un reciclaje constante del ácido láctico. Este es un ciclo que envuelve dos rutas de transporte de productor entre el hígado y los músculos. En el ciclo, el glucógeno muscular es degradado a glucosa y ésta transformada a piruvato mediante la glucólisis. El piruvato pasará a ser ácido láctico por vía de metabolismo anaeróbico gracias a la enzima lactato deshidrogenasa. El ácido láctico es transportado al hígado por la sangre y es reconvertido en piruvato, y luego a glucosa vía gluconeogénesis. Así se crea una circulación cíclica de la glucosa y el lactato entre el músculo y el hígado. No puede mantenerse constantemente, ya que consume 4 ATP más que los producidos en la glucólisis ⁽¹¹⁾.

Otro ciclo parecido, es el de la glucosa-alanina. En el músculo, cuando los aminoácidos ramificados son degradados para la obtención de combustible (en estado de alta demanda de energía y pobre oferta de combustible), los grupos amino son recogidos como glutamato por medio de una transaminación, mientras las cadenas carbonadas sirven como combustible para el metabolismo aeróbico muscular. Este glutamato entrega su grupo alfa-amino al piruvato por medio de la enzima alanina aminotransferasa. La alanina formada pasa a la circulación sanguínea y de ahí al hígado. Después la alanina aminotransferasa pasa el grupo amino de la alanina al alfa-cetoglutarato, formando nuevamente el piruvato y glutamato. EL glutamato ceba el ciclo de la urea liberando amonio. EL piruvato pasa a la gluconeogénesis donde el hígado lo convierte en glucosa, que regresa al músculo por el torrente sanguíneo, donde se prepara para la glucólisis y sirve de combustible, o se almacena como glucógeno muscular ⁽⁷⁾.

1.8. ENTRENAMIENTO AERÓBICO

Factores que determinan el acondicionamiento aeróbico ⁽¹⁾:

- El **VO₂máx** (consumo máximo de oxígeno) es la capacidad que tiene el organismo para absorber, transportar y consumir una cantidad máxima de oxígeno por unidad de tiempo. Se expresa de la siguiente forma: ml·kg⁻¹ ·min⁻¹. Este depende de componentes genéticos en un 70% y de entrenamiento en un 30%. Los valores de VO₂máx que rondan los corredores de resistencia están entre 60-80 ml·kg⁻¹ ·min⁻¹. Cabe destacar que la correlación existente entre el rendimiento y el VO₂máx es baja. Las fibras tipo I, el entrenamiento en altura (debido a las dificultades que presenta) y resistencia/fuerza, tienen un impacto positivo sobre el VO₂máx.
- El **umbral ventilatorio** es la intensidad máxima de esfuerzo que un corredor puede mantener de manera prolongada en el tiempo. Esta se relaciona con el entrenamiento aeróbico y suele tener unos valores en corredores de larga distancia del 80-90% del VO₂máx. Está más relacionado con la mejora del rendimiento que el VO₂máx, ya que el corredor podría mantener una velocidad de carrera constante elevada. Es dependiente de la economía de carrera, que explicaremos a continuación.
- La **economía de carrera** es el consumo de oxígeno (VO₂/kg/min) requerido para correr a una velocidad submáxima determinada. Los valores en corredores altamente entrenados van de 175-220 ml·kg⁻¹ ·km⁻¹. Por ello, los corredores que rondan estos números presentan un menor consumo de O₂ a la misma velocidad, por lo que se relaciona con una mejora del rendimiento en mayor medida que los dos factores anteriores. Las fibras tipo I, el entrenamiento en altura y fuerza/resistencia tienen un impacto positivo sobre la economía de carrera.
- El **umbral lactato (UL)** es el punto en el cual empieza a acumularse el lactato sanguíneo por encima de los valores de reposo, durante un ejercicio de intensidad creciente. A velocidades bajas este permanece cerca de los niveles de reposo, pero en cuanto se aumenta la velocidad (aproximadamente por encima de 1,4 m/s) el lactato en sangre aumenta con rapidez. Este es el punto de inflexión. El UL se expresa como % VO₂máx, y se trata de uno de los mejores determinantes del ritmo para corredores en pruebas de resistencia.

Los principales objetivos del acondicionamiento aeróbico son ⁽¹²⁾:

1. Aumentar la capacidad cardiorrespiratoria de aportar oxígeno al músculo activo.
2. Desarrollar en los músculos activos la capacidad de consumir oxígeno.

Por lo tanto, el entrenamiento de resistencia mediante sobrecarga de grupos musculares específicos mejora el rendimiento y la potencia aeróbica al aumentar tanto la capacidad de transporte de oxígeno como la utilización de oxígeno por el músculo entrenado

Respuesta adaptativa al entrenamiento aeróbico ⁽¹²⁾:

- Adaptaciones metabólicas:

-Aumento del tamaño y el número de mitocondrias

-Duplicación de la actividad metabólica oxidativa

-Aumento del metabolismo de grasas (TAG intramusculares), y mayor lipólisis y movilización de TAG en tejido adiposo: supone ahorro de glucógeno muscular.

-Metabolismo de carbohidratos: mayor capacidad de oxidar carbohidratos en ejercicio intenso.

-Incrementa la capacidad oxidativa de las fibras musculares tipo I y IIa. La interconversión de tipos de fibras (entre lentas y rápidas), no es concluyente.

- Adaptaciones cardiovasculares ⁽¹³⁾:

-Hipertrofia excéntrica del corazón

-Aumento del volumen plasmático y de la volemia.

-Aumento del volumen latido.

-Cambios en la frecuencia cardíaca: menor frecuencia cardíaca submáxima y en reposo.

-Incremento en el máximo gasto cardíaco.

-Aumento y redistribución del flujo sanguíneo al músculo activo

-Aumento de la capacidad de extracción de oxígeno

-Descenso de 10 a 6 mmHg en la presión arterial

-Disminución de las presiones sistólica y diastólica tras 4-6 semanas de entrenamiento aeróbico, tanto en reposo como en ejercicio submáximo.

- Adaptaciones ventilatorias ⁽¹²⁾:

-Aumento del volumen ventilatorio máximo

-Aumento del umbral ventilatorio y disminución del equivalente ventilatorio para el oxígeno a intensidades submáximas

-Menor trabajo ventilatorio a intensidades submáximas, liberando oxígeno para el músculo activo.

Efecto del entrenamiento sobre el umbral de lactato ⁽¹²⁾:

El entrenamiento aeróbico de suficiente intensidad aumenta el umbral de lactato.

El aumento en el umbral de lactato permite entrenar y competir a mayores porcentajes del VO₂ máximo.

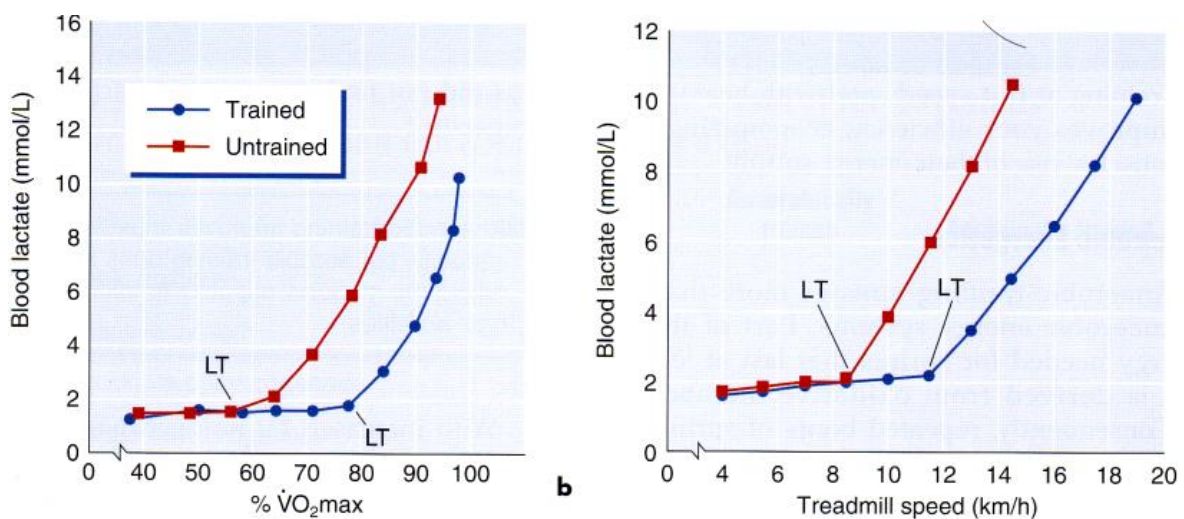


Figura 2. Relación entre umbral de lactato (LT) y el porcentaje de VO₂máx ⁽¹²⁾.

1.9. FATIGA

La fatiga es una serie de modificaciones fisiológicas que dificultan el mantener una misma intensidad durante un esfuerzo. Estos cambios repercuten en el rendimiento del corredor. Algunos autores exponen que este agotamiento es debido al aumento de la ventilación y de la frecuencia cardiaca, y que los factores que determinan la fatiga son la economía de carrera, el VO₂máx y la potencia del tren inferior (Bertuzzi y col., 2012) ⁽¹⁾.

En cambio, otros autores lo atribuyen a factores biomecánicos como pueden ser la variación en la cinemática o coordinación del corredor (Hauswirth, Bigard y Guezennec,

1997; Larson y col., 2011)⁽¹⁾. En todo caso, el entrenamiento resulta de vital importancia para retardar la aparición de la fatiga durante la carrera, es por ello que el agotamiento se aprecia con mayor facilidad en los atletas de menor nivel. El SNC (Sistema Nervioso Central) también puede ocasionar fatiga, como un mecanismo de protección por la insuficiencia de transmisión nerviosa. A nivel celular, la acumulación de H⁺ generada por el ácido láctico reduce el pH muscular, lo que dificulta la contracción muscular y los procesos celulares de producción de energía ⁽⁷⁾.

Otro aspecto relacionado con la fatiga son los calambres, que son contracciones involuntarias, espasmódicas y dolorosas de los músculos esqueléticos que se producen durante o justo después del ejercicio. La causa principal de estos es producto de la actividad de las motoneuronas alfa, debido a un control anormal a nivel medular. La fatiga muscular está relacionada. También se pueden producir por trastornos en el equilibrio de líquidos y electrolitos, relacionado con tasas altas de sudoración ⁽⁷⁾.

El tratamiento ante un calambre consiste en: hacer reposo; estiramientos pasivos; mantener el músculo afectado en la posición estirada hasta que se alivie; y consumir líquidos en caso de deshidratación y pérdida de electrolitos. Igual de importante es prevenirlos, por lo que los deportistas deberían: estar en buena forma, para reducir la posibilidad de sufrir fatiga muscular; estirar regularmente los músculos más solicitados; mantener una buena hidratación; mantener unas buenas reservas de carbohidratos; y reducir la intensidad del ejercicio y duración si fuese necesario ⁽⁷⁾.

1.9.1. NUTRICIÓN

La nutrición es relevante, puesto que afecta a la vida diaria de las personas, no solo a nivel físico, sino también al psicológico. Como menciona Àlex Merí en su libro “Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte”⁽¹⁴⁾.

“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 rápida”.

Los músculos que se activan a la hora de realizar cualquier actividad consumen una mezcla de sustratos metabólicos, y una aportación relativa de grasas y carbohidratos cuya

cantidad depende de la intensidad del propio ejercicio, así como del tamaño de los depósitos de glucógeno disponibles. A intensidades mayores se utilizan más los carbohidratos, mientras que las grasas se utilizan en mayor proporción a medida que el glucógeno que dispone el músculo se agota ⁽¹⁵⁾.

Macronutrientes para el ejercicio

- Hidratos de Carbono y grasas

Tanto los hidratos de carbono (HC) como las grasas son las principales fuentes de energía para nuestro organismo. La oxidación de los hidratos de carbono genera aproximadamente 120 kcal por mol de oxígeno respirado, mientras que la de ácidos grasos genera 100 kcal por mol de oxígeno de manera general. Los HC son el combustible de mayor relevancia en las carreras de mediana y alta intensidad, ya que son los encargados de mantener una adecuada contracción muscular durante el ejercicio. Su contribución al ejercicio depende además del tipo, frecuencia, intensidad y duración del ejercicio, así como del nivel de entrenamiento. Además, la velocidad a la que se puede producir ATP depende tanto del sustrato de combustible como del producto final de la reacción (CO₂ en procesos aeróbicos, independientemente del sustrato, y lactato o creatina en la glucólisis anaeróbica o hidrólisis de fosfocreatina, respectivamente) ⁽¹⁵⁾.

Aunque ambos macronutrientes son fuentes de energía existen diferencias entre ambos tales como ⁽¹⁶⁾:

1. Las grasas aportan mayor cantidad de energía por gramos que los HC (1 gr. de grasa = 9 kcal; 1 gr de HC = 4 cal).
2. Los HC requieren agua para su almacenamiento, mientras que las grasas no.
3. Las reservas corporales de grasa son mayores que las de los HC
4. Como ya se ha dicho, el aporte de ATP que proporciona las grasas es superior a la de los HC (1 molécula de glucosa aporta 30 ATP al músculo, 1 molécula de ácido palmítico aporta 106 ATP, en condiciones aeróbicas), sin embargo, el metabolismo de las grasas requiere mayor aporte de oxígeno que los HC.
5. Se puede obtener una mayor cantidad de ATP de los HC por unidad de tiempo que por parte de las grasas. Esto se traduce en que los HC tengan una función más relevante en los ejercicios de alta intensidad donde la demanda de ATP es más alta.

La ingesta de HC para un atleta depende de la situación del entrenamiento en la que se encuentra ⁽¹⁶⁾:

- Para la recuperación del glucógeno muscular en atletas de ejercicio de baja intensidad y/o que deseen mantener un porcentaje de grasa bajo se recomienda la ingesta diaria de entre 3-5 gr por kg de peso.
- Para la recuperación del glucógeno muscular en ejercicios de moderada intensidad, entre 5-7 gr por kg de peso.
- En ejercicios de alta intensidad (por ejemplo, una maratón) o atletas que busquen aumentar su peso corporal, entre 7-12 gr por kg de peso.
- Recuperación de glucógeno y combustible en ejercicios de extrema intensidad, como es el caso de una ultra-maratón, más de 10-12 gr por kg de peso.

En cuanto a las grasas, para un deportista se recomienda que su ingesta sea de entre un 20-30 %, un porcentaje mayor al de la población no deportista, ya que su programa de entrenamiento producirá un consumo de estas reservas. Aun así, se recomienda que la comida previa a la competencia sea baja en ácidos grasos ⁽¹⁶⁾.

La recuperación del glucógeno muscular para un atleta en una situación de competición resulta de gran importancia y depende en gran medida del índice glucémico obtenido a partir de los HC (antes, durante y después). Esto lo podemos resumir con la siguiente tabla:

Situación Situación Aguda (Antes, Durante o Después del Ejercicio)	Recomendación Situación Aguda
Ingesta diaria para un óptimo depósito de glucógeno muscular (pre y/o post ejercicio)	7 - 12 gr. *kg peso
Recuperación rápida post-ejercicio	1 - 1.2 gr. *kg peso
Ingesta anterior a un ejercicio prolongado	1 - 4 gr. *kg peso 1 - 4 hrs. antes del ejercicio
Ingesta durante un ejercicio de moderada intensidad	0,5 - 1 gr. *kg peso (30 - 60 gts.) por hora de ejercicio
Ingesta durante un ejercicio de alta intensidad	1 - 1,5 gr. *kg peso (60 - 90 gts.) por hora de ejercicio

Tabla 2. Recomendaciones de ingesta de CH para atletas ⁽¹⁶⁾.

- Proteínas

Si bien es conocido que las proteínas no son unas de las principales fuentes de energía, durante la práctica deportiva este puede suponer entre un 5-10 % del consumo de energía

total. Esto supone para un deportista en que después de la actividad aumenta la síntesis proteica, para así determinar un balance nitrogenado positivo ⁽¹⁶⁾.

La ingesta recomendada de proteína en la dieta varía según la actividad deportiva. Para los atletas de resistencia se establece entre 1,4-1,6 gr de proteína por kg de peso corporal. Para la recuperación posterior al ejercicio, se recomienda entre 0,2- 0,4 gr por kg de peso. Una mayor ingesta de proteínas no muestra beneficios, siendo el exceso de estas oxidado para obtener energía ⁽¹⁶⁾.

- Suplementos deportivos

En los últimos años, ha habido bastante controversia con respecto a los suplementos deportivos. Cada vez son más las marcas que intentan promocionar su producto para obtener beneficios económicos. Esto crea confusión entre la población deportista, profesionales, pero sobre todo amateurs que buscan mejorar su rendimiento de manera significativa en un corto periodo de tiempo. Es por ello, que actualmente la clasificación más válida y reconocida en cuanto a la suplementación es la realizada por el Departamento de Nutrición Deportiva en el Instituto Australiano del Deporte en la que se dividen en suplementos aprobados, en evaluación, cuyo beneficio no está claro y prohibidos. Se puede resumir en la siguiente tabla:

Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Aprobado	En evaluación	Beneficio no claro	Prohibido
Líquidos Comidas líquidas Gel, barras Cafeína Creatina Bicarbonato Vitamina C y E Zinc y Vitamina C Multivitamínicos Fierro Calcio Glicerol Electrolitos (reemplazo) Glucosamina	Glutamina Hidroxi metil-Butirato (HMB) Calostro Pro biótico Ribosa Melatonina	Aminoácidos (no de la dieta) Ginseng Cordyceps Inosina Coenzima Q 10 Citocromo C Carnitina Polen abeja Picolinato de Cromo Piruvato Vitamina B 12 (inyectable) Agua oxigenada	Androstenediona Norandrostenediol DHEA Testosterona <i>Tribulus Terrestris</i> (testosterona de origen natural) Efedra Estricnina

Tabla 3. Clasificación de los suplementos según “Australian Institute of Sport” 2006 ⁽¹⁶⁾.

1.9.2. HIDRATACIÓN

La hidratación juega un papel fundamental en el rendimiento de un atleta, puesto que la termorregulación y el balance hídrico, como ya se ha dicho, influyen directamente en el rendimiento. Cabe destacar, que la sensación de sed es una señal de alerta la cual se

produce una vez ya ha ocurrido una importante pérdida del agua corporal, por lo tanto, el atleta puede llegar a deshidratarse antes de que aparezca la sed.

Para un programa de entrenamiento adecuado se ha de atender a los requerimientos individuales del atleta. En el ejercicio físico, la hidratación influye en los siguientes factores ⁽⁷⁾:

- Regulación de la temperatura corporal
- Como vehículo para la entrega de nutrientes a las células musculares
- Eliminación de metabolitos
- Lubricación de las articulaciones

Además, interviene en la concentración de electrolitos importante para la transmisión del impulso nervioso, contracción muscular, el aumento del gasto cardiaco y regulación del PH.

Según Asker E. et al ⁽⁷⁾ se recomienda que la hidratación contenga un contenido en sodio de entre 10-30 mmol/ L para una absorción óptima de líquidos y la prevención de la hiponatremia (pérdida excesiva de sodio mediante el sudor, unido a una ingesta muy alta de agua u otras bebidas bajas en sodio).

La deshidratación produce efectos contraproducentes tanto en la salud como en el rendimiento deportivo, aumentando además la posibilidad de que se produzca una lesión deportiva. La pérdida de peso corporal producida por la deshidratación limita la capacidad que tiene el organismo para eliminar el exceso de calor. Además de la señal de la sed, la deshidratación se manifiesta en calambres musculares, apatía, debilidad y desorientación. Si el atleta continúa con la actividad a pesar de las señales producidas por el organismo, este puede sufrir un golpe de calor y llegar al agotamiento. Aunque en climas fríos también se puede producir deshidratación, es menos frecuente, ya que las altas temperaturas son un factor adverso fundamental ⁽⁷⁾.

1.9.3. EQUILIBRIO ÁCIDO-BASE

El equilibrio ácido-base es el mecanismo responsable de la regulación del pH en el cuerpo humano, que dependiendo de las concentraciones de iones de hidrógeno (H^+) se establece un grado de acidez o de alcalinidad.

En relación con las carreras de larga distancia, se considera uno de los principales responsables de la fatiga muscular, ya que se produce un descenso del pH intracelular ante ejercicios de alta duración/intensidad. De esta forma, se ven afectadas varias enzimas responsables de la contracción muscular, perdiendo así su funcionalidad. La acidosis metabólica se atribuye al aumento de ácido láctico, hecho que conlleva la liberación de un protón y la formación de la base lactato sódico. Debido a esta producción de lactato sódico, se podría desencadenar una respuesta por parte de la célula para inhibir el incremento de compuestos básicos, a través de una mayor liberación de protones, lo que hace que disminuya el pH intracelular ⁽¹¹⁾.

Así, la hidrólisis del ATP en ADP y Pi provoca acidosis metabólica, que cada vez que se divide, por la liberación concomitante de un protón. En un ejercicio prolongado a intensidades relativamente elevadas, un objetivo claro a seguir es no sobrepasar el umbral anaeróbico (velocidad en ruta aeróbica insuficiente como para formar el ATP necesario, se activan vías anaeróbicas para mantener actividad muscular) para evitar la influencia negativa de la acidosis sobre el rendimiento del deportista y la contracción muscular. Aunque hay que destacar que esta acidosis debe ser estudiada, ya que no existe una teoría aceptada universalmente ⁽¹¹⁾.

1.10. LABOR DEL FISIOTERAPEUTA EN CARRERAS DE LARGA DISTANCIA

La intervención del fisioterapeuta es clave tanto en la preparación de la carrera de maratón como en la posterior recuperación. El fisioterapeuta puede no sólo guiar la correcta ejecución de estiramientos, sino que también puede aplicar técnicas manuales y analgésicas y podrá valorar desequilibrios musculares o posturales que, tras ser corregidos, ayudarán a la prevención de estas lesiones en futuras pruebas.

La pronta recuperación del atleta es uno de los principales objetivos del fisioterapeuta, ya que en las carreras de larga distancia se produce una mayor rotura de microfibrillas (sobre todo en las bajadas), ya que se somete al músculo a ejercicios excéntricos. Es importante procurar reducir en mayor medida la fatiga muscular que viene dada muchas veces por una mala organización del plan de entrenamiento, insuficiente recuperación, un rápido aumento de las exigencias de entrenamiento, cargas de alta intensidad empleadas en exceso, participar en pocas competiciones. Los métodos empleados por la fisioterapia para la recuperación de la fatiga muscular se basan en favorecer la llegada de sangre a los

músculos fatigados mediante ayudas mecánicas o físicas, entre las que se encuentra la electroestimulación, la aplicación de masoterapia, estiramientos y baños fríos ⁽¹⁸⁾.

En cuanto al masaje terapéutico y deportivo, la recogida de datos expuesta en la revisión de Urdampilleta et al ⁽¹⁸⁾, muestra que tiene efectos significativamente positivos en la modulación de la inflamación, neurofisiológicos y de movilidad muscular, en la recuperación del dolor muscular de aparición tardía, efectos inmunes y psicológicos; y efectos positivos en la fisiología del sistema nervioso autónomo, cardiovascular y variabilidad del ritmo cardíaco. Además, evidencia que las inmersiones en agua fría resultan más eficaces para la recuperación que las realizadas en agua caliente o templada. Sin embargo, respecto a las medias de compresión posteriores a las pruebas no existen evidencias significativas de su efectividad.

Entre las técnicas previas a la competición para mejorar el rendimiento del atleta de larga distancia destaca el masaje previo a la competición cuyo objetivo es preparar la musculatura y optimizar el rendimiento de manera puntual. El masaje se realizará 48/72 horas previas a la prueba mediante profundidades bajas-medias y ritmos medio- altos para así conseguir un efecto de calentamiento, drenaje, retorno venoso, regenerador, oxigenante y activador ⁽¹⁸⁾.

También resulta de gran importancia el trabajo de estabilidad, pues el añadir una facilitación neuromuscular propioceptiva al entrenamiento permite al corredor obtener mejores resultados. Además, resulta muy importante ganar coordinación y mejorar el tiempo de contracción en la pared abdominal profunda. Para ello, se recomienda realizar ejercicios de preparación general para restablecer la movilidad y corregir cualquier desequilibrio muscular; ejercicios de preparación específica para el entrenamiento de movimientos funcionales; y previo a la competición para la inclusión de ejercicios pliométricos ⁽¹⁹⁾.

En cuanto a las lesiones más frecuentes en la prueba de la maratón vienen determinadas por las características de esta, que somete al cuerpo a un alto nivel de exigencia física, a terreno con una superficie irregular, y la posible deshidratación entre otros.

Entre las lesiones más frecuentes en una carrera de maratón encontramos ⁽²⁰⁾:

- La periostitis: la inflamación del periostio (membrana que recubre el hueso), principalmente de la tibia, debido a que se producen una gran cantidad de impactos contra el suelo.
- Calambres: entumecimiento de la musculatura que puede ser producido por una deshidratación durante la competición o por no llevar una alimentación variada y rica en nutrientes.
- Tendinopatías: producidas por la sobrecarga de los músculos en sus puntos de inserción. Las más frecuentes son la tendinitis rotuliana y aquilea.
- Sobrecarga muscular o contracturas: debido al esfuerzo que supone mantener el ritmo de carrera durante largos periodos de tiempo y el realizar movimientos repetitivos.
- Esguinces: puede ser producido tanto por las condiciones del terreno, o por no tener una musculatura y propiocepción óptima por parte del atleta.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de esta revisión bibliográfica es reunir datos concluyentes con respecto al rendimiento deportivo, asociado a la mejora de las marcas en corredores de maratón y cómo afecta el entrenamiento de estas disciplinas a nivel metabólico. A su vez, establecer cuáles son los factores que determinan el rendimiento, para así compararlos con otros corredores.

Los objetivos secundarios de este estudio son:

- Determinar la relación entre entrenamiento y mejora del estado físico.
- Aumentar el campo de conocimiento de los fisioterapeutas respecto al metabolismo fisiológico del deporte.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ESTUDIOS

Cabe destacar, que ambos participantes del grupo realizamos el curso que puso a nuestra disposición la Universidad de La Laguna a través del aula virtual cuyo tutor es Carlos Marcelino Montesinos Hernández, con el objetivo de conocer las herramientas y servicios que la biblioteca ofrece para la búsqueda y el acceso a la información, así como concienciarnos de la importancia de citar las fuentes consultadas para la elaboración de un trabajo académico.

Para poder realizar esta revisión bibliografía se han utilizado las siguientes bases de datos: PEDro, PUBMED, Punto Q, Hindawi, BioMed Central, Medicine & Science in Sports & Exercise, Taylor and Francis Online, Mdpi, Journal of Applied Physiology, PLOS ONE y Springer Link. Se ha realizado una revisión bibliográfica sistemática de documentos que describen o estudian los factores fisiológicos influyentes y el efecto de factores determinantes cuando se realiza una carrera de larga distancia. Para ello se utilizaron las palabras claves o keys words: “marathon”, “performance”, “runners”, “elite”, “athlete” “long distance”, “training”, “nutrition” y “metabolism”. Estas palabras se combinan de diferentes maneras en el motor de búsqueda.

Excepto en uno de los artículos que tras haber leído mediante prensa de “Runners World” un estudio interesante relacionado con nuestra revisión, decidimos buscar relación en PubMed bajo los términos de “two hour marathon.” Finalmente, accedimos al *free full text* a través del buscador del *Journal of Applied Physiology*.

Cabe destacar, que tras combinar estas palabras en las diferentes bases de datos se obtuvieron generalmente una gran cantidad de artículos, en cambio, a medida que se realizaba una lectura de estos resultados, muchos de ellos carecían de relevancia respecto a esta revisión, pues o bien trataban temas muy específicos o la muestra de participantes en ciertos estudios no nos permitiría obtener unos resultados y unas conclusiones a tener en cuenta. Los artículos han estado todos en inglés, ya que la búsqueda en este idioma resultó ser la más efectiva.

En los criterios de inclusión se aceptaron todos aquellos artículos con un nivel alto de evidencia científica, que estuvieran publicados tanto en revistas con alto nivel de impacto como con escaso nivel de impacto, artículos que no manifestaron en sus características conflictos de interés, que cumplieran unos parámetros de medición cuyo estudio fuera

interesante para la obtención de resultados, y cuyos conocimientos fuesen eficaces para la labor del fisioterapeuta.

Los criterios de exclusión han sido la baja cantidad de muestra en un estudio, la antigüedad de un artículo (ya que estamos hablando de una disciplina en la que los participantes mejoran constantemente, no se han valorado aquellos artículos datados antes del año 2010), y el efecto de determinadas sustancias muy específicas. Además, no se han tenido en cuenta aquellos artículos publicados en blogs o páginas web de poca evidencia científica. Es por ello que, tras una selección inicial de 18 artículos, realizamos una segunda revisión teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión anteriormente expuestos y se han escogido finalmente 12 de ellos.

De los 12 artículos elegido:

- 6 han sido elegidos a través PubMed
- 1 a través de “Taylor and Francis Online”
- 1 mediante la búsqueda en Hindawi
- 1 en Mdpi
- 1 a través de Journal of Applied Physiology
- 1 en Springer Link
- 1 en PLOS ONE

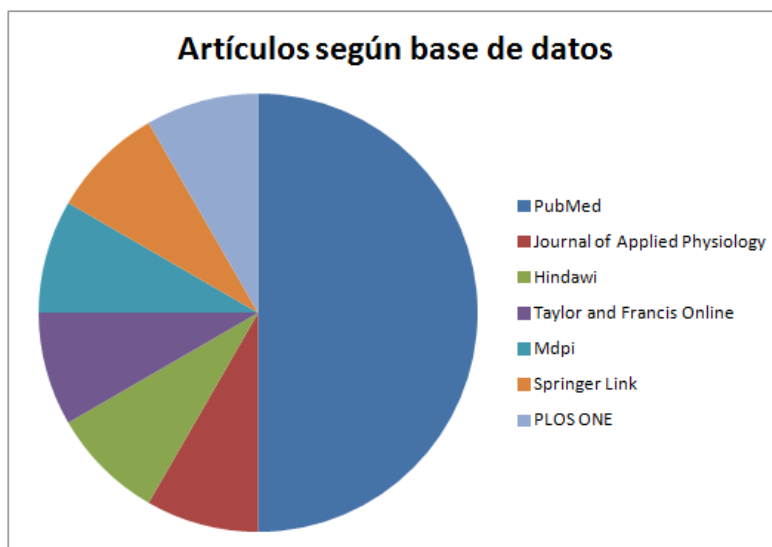


Figura 3. Elaboración propia

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El paso de los años nos muestra que los tiempos de carrera de la maratón van en constante evolución. La historia del rendimiento de resistencia de élite nos puede proporcionar cierta información sobre quién romperá la barrera de 2 horas y cuando podría suceder, pero además hay que atender a una serie de factores que influyen directamente en el rendimiento de los corredores. Este estudio se ha enfocado en componentes de entrenamiento, fisiológicos y algunos aspectos biomecánicos. Todos ellos dotan al corredor de unos atributos esenciales a la hora de competir por las mejores marcas.

¿Qué diferencias existen entre corredores según el rendimiento en las carreras de larga distancia?

Para contestar esta pregunta, hemos seleccionado un estudio realizado por Ogueta et al ⁽²¹⁾, que tiene como objetivo establecer tanto similitudes como diferencias entre corredores de larga distancia (en este caso, media maratón) clasificándolos según su nivel de rendimiento. Para ello, se escogieron 48 corredores masculinos que fueron divididos en 4 grupos conforme a sus marcas: Grupo 1 (n = 11, <70 min), Grupo 2 (n = 13, <80 min), Grupo 3 (n = 13, <90 min), Grupo 4 (n = 11, <105 min).

En primer lugar, se registraron las características antropométricas que estaban relacionadas con el entrenamiento y se llevó a cabo una prueba incremental (6 km/h de inicio, incrementando 1 km/h por minuto) en tapiz rodante. Al siguiente día se ejecutó una prueba submáxima (6 min corriendo a 11, 13, 15 km/h con un descanso de 5 min entre ellas). Ambas pruebas sirvieron para recoger datos acerca de los factores fisiológicos determinantes. Además, también se realizaron mediciones antropométricas. Ambas vienen reflejadas en la siguiente tabla ⁽¹⁹⁾:

	G1 (n = 11)	G2 (n = 13)	G3 (n = 13)	G4 (n = 11)	r
Running performance (min)	66.0±2.3*†#	73.0±3.4†#	85.2±2.5#	96.0±3.2	---
Running experience (years)	16.5±5.6*†#	11.0±3.7†#	4.5±3.3	3.6±4.2	-0.75
Training volume (km·week ⁻¹)	118.6±30.3*†#	85.8±23.3†#	51.7±21.3	43.3±15.4	-0.80
Mass (kg)	66.5±5.3†#	68.1±5.0†	73.0±5.6	73.0±8.9	0.45
Body mass index (kg·m ⁻²)	21.4±1.4†#	21.1±0.9†#	23.3±1.3	24.1±2.4	0.64
Σ of 6 skinfolds (mm)	37.4±9.1†#	40.4±6.3†#	58.6±13.8#	70.3±15.9	0.78
Peak speed (km·h ⁻¹)	22.1±0.8*†#	20.6±1.0†#	18.8±0.4#	17.4±0.9	-0.92
VO _{2max} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	69.2±5.0*†#	64.4±5.7†#	56.9±4.5	55.9±6.2	-0.76
VO _{2max} (ml·kg ^{-0.75} ·min ⁻¹)	197.4±13.8*†#	184.9±14.1†#	166.1±13.2	163.1±16.0	-0.67
RCT speed (km·h ⁻¹)	18.6±1.2*†#	17.4±1.2†#	15.5±0.8#	13.8±1.1	-0.92
RCT—% VO _{2max}	87.8±4.8	90.2±3.7	87.6±5.0	84.4±5.3	-0.33
VT speed (km·h ⁻¹)	12.7±1.2*†#	11.8±1.3†#	10.2±0.5	9.8±1.3	-0.76
VT—% VO _{2max}	58.9±4.5	61.1±7.1	59.7±6.4	62.7±7.4	0.11
RE (ml·kg ⁻¹ ·km ⁻¹)	196.1±18.8#	205.5±12.1	205.2±12.9	219.5±18.4	0.39
RE (ml·kg ^{-0.75} ·km ⁻¹)	559.7±55.1#	590.0±35.6	600.0±41.8	640.4±52.8	0.50
RER (VCO ₂ ·VO ₂ ⁻¹)	0.79±0.05#	0.83±0.06	0.84±0.06	0.89±0.05	0.51

Tabla 4. G1, G2, G3, G4, grupos de corredores de diferente nivel de rendimiento (<70, <80, <90 y <105 min, respectivamente). Σ de 6 pliegues cutáneos, suma de seis pliegues cutáneos. VO_{2max}, captación máxima de oxígeno. RCT, umbral de compensación respiratoria. TV, umbral ventilatorio. RE, economía corriente. RER, relación de intercambio respiratorio. *, diferencias significativas con el Grupo 2. †, diferencias significativas con el Grupo 3. #, diferencias significativas con el Grupo 4. r, correlaciones significativas (p <0.05) en negrita ⁽²¹⁾.

En primer lugar, hay que destacar que los cuatro grupos de corredores mostraron características similares en cuanto la edad (32.0 ± 7.0 años), altura (176.0 ± 5.0 m), longitud total de pierna y la circunferencia máxima de las 3 tomas realizadas en la pierna (muslo, canilla y tobillo). El Grupo 1 que son los atletas con mejores marcas, se caracterizan por tener más años de experiencia (ES = 1.62), un mayor volumen de entrenamiento semanal (ES = 1.65), una menor masa corporal (ES = 0.55), un menor índice de masa corporal (ES = 1.42), un menor sumatorio de pliegues (ES = 2.08), una mayor capacidad de mantener velocidades máximas constantes (ES = 3.27), unos valores de VO_{2max} (expresado en ml · kg⁻¹ · min⁻¹) altos (ES = 1.31), un mayor umbral de compensación respiratoria (ES = 3.16), una mayor velocidad de umbral ventilatorio (ES = 1.80), una mejor economía de carrera (ES = 1.06). Estos valores tienen un efecto significativo en el rendimiento (p <0.01), y se relacionaron con el rendimiento de carrera (p<0.05). Los resultados obtenidos en este estudio han sido estudiados anteriormente en otra investigación de Gómez JM ⁽²²⁾ en la que se tienen en cuenta las mismas variables fisiológicas, de entrenamiento, antropométricas y biomecánicas. Este estudio coincide con Ogueta ⁽²¹⁾ en que estas variables proporcionan un mejor rendimiento, incluso algunas de estas variables en mayor medida.

Por otro lado, el estudio realizado por Tam et al ⁽²²⁾, trata de determinar cuáles son los factores por los que los corredores de larga distancia keniatas muestran grandes marcas. Para ello, se escogieron a 10 corredores keniatas de élite (todos con marcas inferiores a 2h 9 min) y a 9 caucásicos que han servido como grupo de control. Se han establecido para ello 3 parámetros a tener en cuenta para comparar ambos grupos de corredores: el coste de carrera (Cr), el $VO_{2m\acute{a}x}$ y la fracción sostenible de carrera (Fd).

Finalmente, oponiéndose a los resultados esperados y a los expuestos en el anterior artículo los resultados han evidenciado que no hay diferencias significativas entre el grupo de keniatas y el grupo de control con respecto a los parámetros estudiados. Ambos grupos han presentado un $VO_{2m\acute{a}x}$ alto, un Fd extremadamente alto y un Cr bajo. El entrenamiento y la disciplina de carreras de larga distancia produce unos cambios fisiológicos respecto a la capacidad aeróbica que diferencia a estos atletas de élite de los corredores amateur. Los corredores de Kenia tienen un nivel alto de $VO_{2m\acute{a}x}$, pero no tan alto, al igual que los otros parámetros, los europeos presentan unos parámetros similares. En un estudio de Joyner et al ⁽⁴⁾, se muestra que los valores de $VO_{2m\acute{a}x}$ de los corredores keniatas no son excepcionales (al igual que del umbral lactato) y que tienen una economía de carrera sobresaliente. Este último factor es importante, ya que en el artículo se destaca que quien rompa la barrera de las 2 h probablemente tenga una economía de carrera sobresaliente. Se destaca la importancia de seguir investigando acerca de cuánto afecta el $VO_{2m\acute{a}x}$ en el rendimiento.

En otro estudio llevado a cabo por Joyner et al ⁽⁴⁾, se establece un valor promedio del $VO_{2m\acute{a}x}$ para los corredores de élite, que rondan entre ~ 70 a ~ 85 ml \cdot kg⁻¹ \cdot min⁻¹. Esto les permite mantener durante más de 1h velocidades de carrera que requieren 85-90% $VO_{2m\acute{a}x}$. Además, afirma que el tamaño corporal pequeño tiene un efecto favorable en el $VO_{2m\acute{a}x}$, aunque no se llega a comprobar de forma definitiva si tiene influencia sobre la economía de carrera.

Entrenamiento

Otro aspecto de suma importancia de cara al rendimiento en carrera es el entrenamiento a temprana edad (mejora gradual de fibras I) y a altas altitudes en este tipo de disciplina, ya que esto afecta directamente a la capacidad aeróbica, tal como se expone en el artículo realizado por MJ Joyner et al ⁽⁴⁾. Aunque no existe una opinión uniforme respecto a cuál es la edad adecuada para la realización de una maratón, expertos que

afirman que realizar estas disciplinas puede ser perjudicial para la salud, existen muchos finalistas en pruebas de maratón con edades inferiores a los 18 años, incluso el caso de un niño de 7 años. En ninguno de estos casos se presentó una lesión médica significativa. Por lo tanto, William O. Roberts ⁽²⁴⁾ recomienda la participación de atletas jóvenes en estas carreras siempre y cuando no afecte a su desarrollo social, académico, psicológico.

En la revisión realizada por Tanda G. et al ⁽²⁵⁾ a este respecto, se trata de describir la importancia del entrenamiento en las carreras de larga distancia, específicamente en la maratón de 42 km y la ultra-maratón de 100 km, para ello hace una recogida de datos de atletas de ambas disciplinas (un grupo de 46 corredores de maratón estudiados por Tanda, otro grupo de 126 corredores de maratón estudiados por el investigador Barandun et al y 169 corredores de ultra-maratón por Knechtle et al), atendiendo al índice de masa corporal (IMC), el porcentaje de grasa corporal; y volumen e intensidad de entrenamiento (que son factores de capacitación).

El análisis de los resultados demostró que existe una correlación directa entre la distancia media recorrida de entrenamiento por semana (K) y la intensidad del entrenamiento (P) registrados antes de la carrera (durante 8 semanas o 3 meses) con respecto al tiempo de finalización de la carrera. Tal como se muestra en la *figura 5* ⁽²⁵⁾, en los corredores maratonianos la distancia media recorrida de entrenamiento por semana (K) está altamente relacionado con el ritmo de carrera P (intensidad de entrenamiento) por medio de una curva en forma de una desintegración exponencial (con un coeficiente de correlación de $r = 0,68$). Teniendo en cuenta que este dato ha sido recogido por dos investigadores dentro del mismo estudio, reafirma la evidencia de este resultado. En cambio, en los ultra maratonianos está correlación entre carrera P y K fue débil, únicamente presentó una correlación significativa en aquellos atletas cuyo porcentaje de grasa corporal era superior al 15% ⁽²⁵⁾.

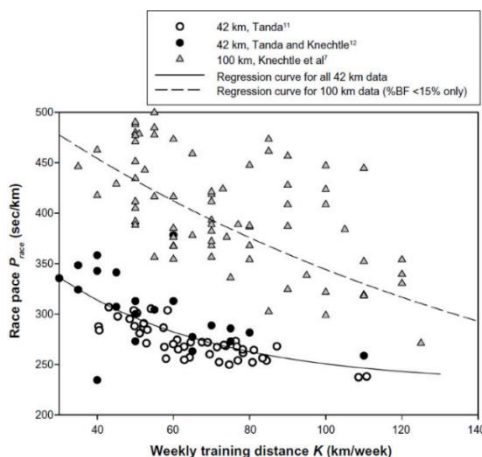


Figura 4. Correlación directa entre la distancia media recorrida de entrenamiento por semana (K) y el ritmo de carrera (P) ⁽²⁵⁾.

Además, se verificó la correlación entre el BF % (porcentaje de grasa corporal) y el ritmo de carrera, que tendió a aumentar linealmente a mayor porcentaje de grasa corporal, pero la correlación únicamente resultó ser significativa en aquellos individuos con un BF > 15 %. Si solamente tenemos en cuenta a aquellos individuos con un BF < 15 % no encontramos una relación significativa entre ambos parámetros. Por lo tanto, una mayor cantidad de grasa corporal no resulta beneficiosa para aquellos atletas que deseen mejorar sus tiempos. Aun así, hasta un aumento del 15 % no parece existir una diferencia que resulte realmente significativa. Aunque en estas disciplinas, escasas diferencias de tiempo pueden suponer la diferencia entre un corredor de élite y uno de alto nivel, es por ello que los corredores de maratón masculinos de élite tienen una media de un 7,5 % de grasa corporal cantidad que se ha mantenido similar en las mediciones realizadas los últimos años ⁽²⁶⁾.

La intensidad de entrenamiento surgió como la variable principal que predecía el rendimiento de carrera de 42 km (por lo que se recomienda realizar entrenamientos de alta intensidad), mientras que el volumen de entrenamiento resultó ser el principal factor que predecía 100 km de tiempo de carrera (se ha de atender pues, más a este aspecto). Por lo tanto, estos son los principales factores a tener en cuenta para la planificación del entrenamiento. Además, para ambas disciplinas resulta de gran trascendencia mantener un porcentaje de grasa corporal inferior al 15 % ⁽²⁵⁾.

Abundando en el papel que juega el entrenamiento, otro estudio realizado por Tan et al ⁽²⁷⁾, trata de comparar qué aspectos del entrenamiento influyen en una carrera de larga distancia (en este caso, una ultra-maratón tropical de 161 km), y qué diferencia a un participante que ha sido capaz de finalizar la prueba del que no. Para la recogida de datos contaron con la participación de 12 sujetos que finalizaron la prueba (FIN), y de 14 sujetos que no la lograron finalizar (N-FIN). La recogida de datos fue realizada durante esta misma prueba dos años consecutivos para así obtener una mayor muestra y ninguno de los corredores había concluido previamente una carrera de 161 km.

Para la preparación ante esta prueba, 18 participantes realizaron su preparación mediante entrenamiento cruzado (es una combinación de distintas actividades deportivas que combinadas mejoran el rendimiento de una de ellas), de los cuales 12 (7 FIN, y 5 N-FIN) utilizaron ejercicios aeróbicos, mientras que 6 (3 FIN y 3 N-FIN) optaron por el entrenamiento de resistencia. De los 12 participantes que completaron la prueba 10 de ellos practicaban entrenamiento cruzado de manera regular, mientras que de los 14

participantes que no lograron finalizar la prueba sólo 8 lo hacían de manera regular (siendo las horas dedicadas a estas disciplinas inferiores a la del grupo de corredores que sí lograron terminar la carrera.). Estos resultados indican que las diferencias solo fueron moderadas (ES = 0,73). Los efectos de las distintas intensidades de entrenamiento en este estudio no han sido claras, aunque se concluye que el entrenamiento a velocidades por debajo de v_{LT2} (velocidad en el segundo umbral de lactato) tiene resultados favorables. Tenemos que tener en cuenta que, tal como se expone en la introducción de este trabajo, que la finalidad del entrenamiento o acondicionamiento aeróbico es la de aumentar la capacidad cardiorrespiratoria de aportar oxígeno al músculo activo y desarrollar en los músculos activos la capacidad de consumir oxígeno. Por lo tanto, las variables a tener en cuenta y cambios en el entrenamiento para la mejora de resultados irán encaminados a estos objetivos.

La nutrición

La nutrición es un aspecto a tener muy en cuenta para los atletas de larga distancia. Se han seleccionado dos artículos que se centran en el área de nutrición deportiva, específicamente en corredores de larga distancia. Estos han sido realizados durante los últimos años, de manera que la información es reciente, ya que es uno de los parámetros que se encuentran en constante evolución.

El primero de ellos es una revisión de Jeukendrup et al ⁽¹⁷⁾ en la que se enfatiza que los hidratos de carbono son de vital importancia, tanto antes como durante el ejercicio de resistencia, para una ejecución óptima. Además, el momento adecuado de su consumo son 3-4 horas antes del ejercicio, mientras que si la ingesta de glucosa se realiza 1 hora o menos antes de la competición puede provocar hiperglucemia (seguido de la caída de glucosa en sangre), lo que es probablemente resultado de un aumento de la captación de glucosa en los músculos, así como una reducción de producción de glucosa en el hígado. Aparte de hiperglucemia, y como consecuencia de esta, también se produce hiperinsulinemia con inhibición consecuyente de la lipólisis y la oxidación de las grasas, lo que puede conducir a una depleción más rápida del glucógeno muscular y un rápido descenso de glucosa en sangre 15-30 min tras el comienzo del ejercicio. Esto se conoce como *hipoglucemia reactiva o de rebote*. De todas formas, se recomienda un enfoque más individualizado, ya que se demuestra que en atletas altamente entrenados no supone un deterioro del rendimiento, debido a que no siempre se producen los síntomas de

hipoglucemia ante esta situación. Es de destacar que la ingesta de carbohidratos <15 min previos al ejercicio produce efectos similares en el rendimiento que en aquellos casos en los que se ha consumido durante la actividad. Es importante comenzar con altas concentraciones de glucógeno muscular, que se consiguen con el consumo de carbohidratos antes y durante la competición. Esto resultará en una mejora del rendimiento y permitirá tasas de oxidación de carbohidratos más altas.

Además, se recomienda para los corredores altamente entrenados la ingesta de carbohidratos de 10-12g/kg/día durante las 36-48 h previas a una carrera y una puesta a punto del entrenamiento (Burke, 2015) ⁽¹⁷⁾.

En el mismo artículo ⁽¹⁷⁾ también se da a conocer que la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio aumenta el rendimiento, aunque se echan en falta estudios relevantes en este campo. Actualmente, se conoce que los carbohidratos que se ingieren durante el ejercicio se oxidan a una velocidad no superior de 1 gramo por minuto. Por lo tanto, se recomienda consumir entre 30-60 g de carbohidratos durante el ejercicio de larga distancia (>1h).

Igual de importante que la ingesta de nutrientes es la hidratación, tanto antes como durante el ejercicio. La hidratación de un corredor antes del ejercicio se ha de realizar lentamente al menos durante las 4 horas previas a la actividad deportiva (aproximadamente entre 5-7 ml/kg de peso corporal). A su vez, para evitar grandes pérdidas de fluidos durante la competición se ha de mantener un equilibrio, que se consigue mediante la hidratación combinada con un correcto aporte de carbohidratos al músculo activo. ⁽¹⁷⁾ Otro estudio ⁽²⁹⁾ refuerza estos resultados, ya que establece unos valores de consumo de fluidos por hora de 0.55 ± 0.34 L. Esto evita que haya excesiva pérdida de fluidos por sudoración durante la carrera, lo cual ha sido demostrado en atletas de élite. Para optimizar una carrera de resistencia, es importante comenzar euhydratado (contenido de agua corporal normal), intentar minimizar la deshidratación y limitar las pérdidas de masa corporal a través de la sudoración al 2-3% de la masa corporal. En cualquier caso, la bebida ha de contener sodio (10-30 mmol/ L) para una absorción óptima de líquidos y la prevención de la hiponatremia (pérdida excesiva de sodio mediante el sudor, unido a una ingesta muy alta de agua u otras bebidas bajas en sodio). Existen controversias respecto a esto, ya que no hay evidencias que sugieren que estos suplementos de sodio sean necesarios para evitar el desarrollo de hiponatremia en atletas

altamente entrenados. En cualquier caso, es necesario realizar más estudios que avalen estos resultados.

Un factor que hay que tener en cuenta de cara a maximizar el rendimiento del atleta en general y del maratoniano en particular es la velocidad a la que se puede producir ATP para potenciar las contracciones musculares. En el estudio de Rapoport et al ⁽¹⁵⁾ se precisa que: los procesos anaeróbicos de hidrólisis de la fosfocreatina y la conversión de glucógeno en lactato se producen a 73.3 y 39.1 mmol ATPs-1, respectivamente; a diferencia de los procesos aeróbicos, que requieren de la oxidación completa del glucógeno muscular, el glucógeno hepático o los ácidos grasos derivados del tejido adiposo, producen como máximo 16.7, 6.2 y 6.7 mmol ATP s-1, respectivamente. Por lo tanto, se muestra la importancia que tienen las reservas de carbohidratos para los corredores de resistencia, que como comentamos anteriormente en la introducción de esta revisión, la producción de ATP tiende a disminuir a medida que aumenta el tamaño del depósito de combustible. Esta carga previa a la competición confiere al corredor la capacidad de mantener el ritmo de carrera durante un mayor tiempo, además de retrasar la fatiga, ya que una de las razones de su aparición es la depleción de las reservas de glucógeno. Esos niveles bajos de glucosa en plasma y glucógeno durante el ejercicio promueven la lipólisis y la liberación de ácidos grasos del tejido adiposo, lo cual conlleva una disminución de la eficiencia energética de la utilización del oxígeno, pero previene un agotamiento total del glucógeno. Esto explica la importancia de estos en los diferentes momentos de la carrera, que se verá reflejado en la siguiente figura ⁽¹⁵⁾ en donde se muestra el uso fraccional de hidratos de carbono y grasas:

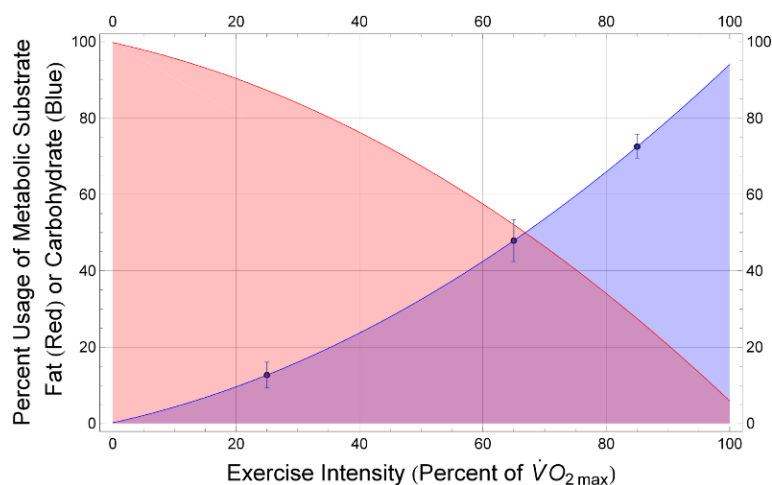


Figura 5: El uso relativo de grasas e hidratos de carbono como combustible metabólico depende de la intensidad del ejercicio ⁽¹⁵⁾.

La curva azul representa el uso fraccional de los carbohidratos (glucosa plasmática y glucógeno muscular) y la curva roja representa el uso fraccional de las grasas (ácidos grasos plasmáticos y triglicéridos musculares). Estos se muestran en relación con la intensidad relativa del ejercicio, y vienen determinados por la siguiente fórmula: $i = \%VO_{2m\acute{a}x}$. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio (aumento $\% VO_{2m\acute{a}x}$), el uso de los carbohidratos aumenta gradualmente y el de las grasas va disminuyendo de la misma forma. Cuando la intensidad disminuye, ocurre de forma inversa. El organismo del deportista de resistencia utiliza el metabolismo aeróbico, a través de los hidratos de carbono (como glucógeno en el músculo e hígado) y los triglicéridos intramusculares. Cuando se vacían los depósitos de glucógeno, se da una bajada del ritmo de carrera, conocido como “la pared” y es cuando se activa el ciclo de glucosa-alanina y la utilización de aminoácidos ramificados.

El otro artículo seleccionado dentro de este apartado de nutrición, realizado por Krzysztof et al ⁽³⁰⁾ muestra que para sostener durante la carrera un estado energético adecuado, el corredor de maratón debe mantener un índice glucémico adecuado y compara el rendimiento de una dieta baja en carbohidratos con respecto a una dieta con un consumo de carbohidratos moderado. Cabe destacar, que estas dietas se siguieron durante tres semanas, con la participación de 21 corredores entrenados de resistencia. Se trata de un ensayo clínico cruzado aleatorizado.

Los resultados más relevantes fueron: 1. Masa corporal. Mientras los participantes que siguieron una dieta con índice glucémico moderado la masa corporal se mantuvo constantes, como era previsible, en aquellos atletas con una dieta con índice glucémico bajo esta se redujo como media 0,8. 2. Capacidad aeróbica. Se testó mediante un cicloergómetro, aumentando la carga de trabajo gradualmente cada 1.5 min, hasta alcanzar el máximo agotamiento, evaluado mediante la escala de Borg. El $VO_{2m\acute{a}x}$ aumentó significativamente con la dieta de índice glucémico moderado en comparación con el valor inicial ($p=0,0159$), mientras que el tiempo hasta el agotamiento mejoró después de la dieta de bajo índice glucémico en comparación con el valor inicial ($p = 0,0474$). 3. Frecuencia cardíaca máxima. Se encontraron diferencias significativas en la frecuencia cardíaca máxima, tanto en índice glucémico bajo como en índice glucémico moderado. 4. Tiempo hasta el agotamiento. Aumentó de manera significativa, tanto con la dieta de índice glucémico bajo como con la de índice glucémico moderado (0,6 min y 0.5 min respectivamente). 5. Rendimiento de resistencia. Se evaluó en una prueba de 12

min, en el cual la distancia recorrida fue significativamente mayor ($p=0,0015$) después de la dieta de índice glucémico bajo en comparación con la línea inicial, pero no cambió tras la dieta de índice glucémico moderado con respecto al inicio del estudio. Cabe destacar que este es de los pocos estudios que examina el efecto de las dietas que difieren en corredores de resistencia que difieren en IG durante un tiempo medio-largo (3 semanas). Los hallazgos deben ser corroborados en ensayos más amplios realizados en distintas poblaciones de atletas ⁽³⁰⁾.

Estudios previos estudian el efecto del IG en el rendimiento deportivo, donde se evaluó el efecto de una única comida pre-ejercicio con un IG diferente, sobre el rendimiento en carreras de resistencia, encontraron que el rendimiento mejoró después de la comida con IG bajo o que la IG no tuvo influencia en el rendimiento ^(31,32).

La recuperación tras la carrera de larga distancia

Para el óptimo rendimiento de un atleta de larga distancia es esencial la recuperación, para poder medir la capacidad de trabajo que puede acumular durante las épocas de entrenamiento. Para ello, atendemos tanto a las variables de capacidad aeróbica, el daño muscular y los marcadores bioquímicos tras la carrera.

El artículo publicado por Takayama et al ⁽³³⁾ nos habla de los efectos de la maratón en cuanto a la aptitud aeróbica y rendimiento. En él se pretende probar la hipótesis de que la carrera de maratón no produciría diferencias fisiológicas una semana después de la carrera. Para ello, se precisaron de 11 corredores amateurs (6 hombres y 5 mujeres). Los criterios de inclusión al estudio eran: entrenar un mínimo de 3 días por semana, ser individuos sanos, tener una edad adulta y no ser fumadores. Se realizaron mediciones a la misma hora 1-2 semanas antes de la prueba (PRE) y 7 días después de la misma (POST). Durante la prueba de tapiz rodante, la economía de carrera no mostraba diferencias ni antes ni después con respecto a la carrera. Las diferencias entre los dos momentos estudiado en cuanto a $VO_{2máx}$, el umbral de lactato y el pico de velocidad se revelaron diferencias poco claras o triviales. Por lo tanto, no se encontraron diferencias significativas entre la medida PRE y POST y los principales factores que determinan el acondicionamiento aeróbico no se vieron afectados.

Un factor que afecta enormemente a la recuperación del deportista de resistencia es el dolor muscular percibido. Se ha valorado mediante la escala del dolor de 0 a 10 (donde 0 es nulo y 10 es máximo). Esta cuestión se les planteó a los corredores antes del test y

durante los siguientes 6 días después de la prueba (a la misma hora) dónde se valoraron los siguientes músculos según el nivel de dolor: extensores de rodilla, flexores de rodilla, flexores plantares, flexores/extensores de cadera, espalda superior, espalda baja, hombros y flexores/extensores de codo ⁽³³⁾.

La respuesta de los corredores muestra diferencias significativas del dolor percibido a lo largo de los días. Durante los 2 días siguientes a la prueba se mostró un aumento de dolor de los extensores de rodilla y de manera muy probable después de 3 días. En los flexores de rodilla y cadera, el aumento del dolor era más probable entre los dos primeros días después de la maratón. En el caso de los flexores plantares y la parte superior e inferior de la espalda el dolor fue más notable un día después y muy probable 2 días después de la prueba. En cuanto a la musculatura del hombro el dolor fue percibido más probable un día después de la maratón y también 2 días después. Por último, los flexores y extensores de codo percibieron dolor poco notable un día después de la prueba. De la misma manera, el dolor muscular percibido a partir del 4º día hasta el 7º día no se manifestó de manera clara, concluyendo que tras 7 días el dolor muscular percibido antes de la prueba no variaba considerablemente con respecto a la medición obtenida antes de la prueba ⁽³³⁾.

	Before	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days
Knee extensors	1.0 ± 1.3	6.1 ± 2.2****	4.8 ± 2.2****	2.8 ± 1.9***	1.9 ± 1.2	1.1 ± 0.9	1.2 ± 1.1	0.7 ± 1.1
Knee flexors	1.4 ± 1.2	5.2 ± 2.4****	4.0 ± 2.2****	2.5 ± 1.8	1.5 ± 1.1	1.2 ± 1.1	1.3 ± 1.0	0.7 ± 1.1
Plantar flexors	1.7 ± 2.2	4.9 ± 2.0****	3.5 ± 2.1***	1.9 ± 1.5	1.4 ± 1.3	1.3 ± 1.1	1.2 ± 1.0	0.6 ± 1.0
Hips	0.9 ± 1.4	4.0 ± 2.9****	2.9 ± 2.3****	1.6 ± 1.4	1.3 ± 1.3	1.2 ± 1.5	1.1 ± 1.1	0.9 ± 1.3
Upper back	0.5 ± 0.8	1.8 ± 1.9****	1.5 ± 1.4***	0.5 ± 0.8	0.4 ± 0.7	0.3 ± 0.6	0.5 ± 1.0	0.3 ± 0.6
Lower back	0.7 ± 1.0	2.6 ± 2.6****	2.0 ± 2.2***	1.2 ± 2.0	0.8 ± 1.8	0.7 ± 1.7	0.6 ± 1.2	0.5 ± 0.8
Shoulders	0.9 ± 1.6	2.8 ± 2.6****	1.9 ± 2.0**	0.8 ± 1.0	0.5 ± 0.8	0.5 ± 0.8	0.6 ± 1.1	0.5 ± 0.8
Elbow flexors	0.7 ± 1.6	1.8 ± 1.8**	0.8 ± 1.3	0.5 ± 0.8	0.3 ± 0.6	0.1 ± 0.3	0.2 ± 0.4	0.1 ± 0.3
Elbow extensors	0.6 ± 1.6	1.2 ± 1.7	0.5 ± 1.0	0.2 ± 0.6	0.2 ± 0.6	0.1 ± 0.3	0.1 ± 0.3	0.2 ± 0.6

Qualified likelihood was shown as increased number of symbols: *possible, **likely, ***very likely, and ****most likely.

Tabla 5. Dolor muscular percibido antes y durante los 7 días después de la competición, medido mediante la escala de dolor de 1-10 ⁽³³⁾.

Los resultados obtenidos en este estudio contradicen la creencia popular que establece en tiempos superiores a 1 semana la recuperación tras una maratón. De todas formas, aunque los resultados de este estudio parecen demostrar que la recuperación es satisfactoria al cabo de 1 semana, sería conveniente corroborar estos resultados con nuevos estudios, y una vez constatados, divulgar esta información con el objetivo de concienciar a los atletas tanto amateur como de competición.

Aparte de las consecuencias ya analizadas, las carreras de muy larga duración como los maratones, tan exigentes en cuanto a la fisiología y metabolismo del organismo del atleta, generan también cambios en muchos marcadores bioquímicos. En el artículo de Shin ⁽³⁴⁾ el objetivo fue comparar los cambios que se producen en los marcadores bioquímicos a nivel del músculo, del metabolismo hepático y sobre la función renal. Los participantes del estudio fueron 15 atletas de resistencia amateur con características físicas y demográficas similares, que cursaron en un maratón y un ultra-maratón de 100 km o 308 km. Los sujetos fueron sometidos, tanto antes como después de la competición, a extracciones de sangre para identificar los parámetros comentados anteriormente. Posteriormente estos datos fueron analizados estadísticamente.

Los marcadores bioquímicos de relevancia medidos en este estudio han sido la creatina quinasa (CK), el lactato deshidrogenasa (LDH), la alanina transaminasa (ALT), y el aspartato aminotransferasa (AST). Tanto la CK y LDH, son marcadores del daño muscular (tanto agudo como crónico) y necrosis celular. Su activación puede aumentar los síntomas como el dolor, la fatiga y la disminución de la fuerza muscular en el ejercicio de alta intensidad y larga distancia debido a los músculos dañados. En cuanto a la ALT y AST son marcadores de enfermedad hepática, y aumentan tras la carrera de larga distancia. Por otra parte, este estudio pone de manifiesto que las carreras de larga distancia pueden ocasionar una lesión renal aguda temporal ⁽³⁴⁾.

Además, se obtuvieron resultados de metabolismo hepático en base a la distancia recorrida. La albúmina aumentó de manera significativa después de la maratón, pero disminuyó después de la ultra-maratón de 308 km. La T-bilirrubina, la D-bilirrubina, AST y ALT aumentaron significativamente según aumentaba la distancia recorrida, siendo significativamente mayor en la carrera de 100 km que en la maratón, y siendo significativamente mayor en la carrera de 308 km que en la de 100. En cuanto al nivel de γ -GTP aumentó significativamente después de los 100 km y disminuyó después del

recorrido de 308 km ($P < 0.05$) y fue significativamente más bajo después de la carrera de 308 km que en la maratón ⁽³⁴⁾.

Los cambios en los marcadores de la función renal y el metabolismo muscular son los siguientes: BUN (blood urea nitrogen), la creatina, CK y LDH aumentaron significativamente después de completar todos los cursos, es decir, fueron significativamente más alta después de finalizar la carrera de 100 km que la maratón y fueron significativamente más baja tras completar los 308 km respecto la carrera de 100 km. En cuanto al ácido úrico aumentó significativamente tras la maratón y la carrera de 100 km, en cambio, no varió entre la carrera de 100 km y la de 308 km.

Estos datos sugieren que la lesión muscular y la disminución de la función hepática debido al aumento de la filtración de enzimas orgánicas específicas en la sangre fueron superiores después de completar la carrera de larga distancia a una menor intensidad (en este caso, la carrera de 308 km) en comparación con la maratón o la ultra-maratón de 100 km. La hemólisis en sangre fue mayor después de la carrera de 308 km que la maratón o la carrera de 100 km, y la disminución temporal de la función renal debido a una disminución en el flujo sanguíneo renal fue mayor después de la carrera de intensidad medio-alta (100 km corriendo) ⁽³³⁾. Asimismo, el estudio realizado por Clemente ⁽³⁵⁾ mide las modificaciones bioquímicas después de una maratón de montaña muestra que efectivamente esta disciplina supone una destrucción muscular, conjunta con una progresiva oxidación de triglicéridos, según se va acercando al final de la carrera, así como una creciente concentración sanguínea de lactato hasta valores ligeramente por debajo del OBLA (inicio de acumulación de lactato en la sangre).

Otros aspectos a tener en cuenta

Cuando queremos determinar el rendimiento de un corredor, hay que tener en cuenta otra serie de factores que pueden influir como son la edad, el sexo, el patrón de pisada y etnicidad, entre otros.

En el presente estudio de Lara et al ⁽³⁶⁾, trata establecer una relación entre la edad y el tiempo de carrera en maratonistas de élite teniendo en cuenta también el sexo del atleta. Se realizó una recogida de datos de la maratón de Nueva York (ediciones 2010 y 2011), donde se analizaron los tiempos de los diez hombres y mujeres más importantes por intervalo de tiempo de 1 año (entre 15-75 años en hombres, 20-70 en mujeres). Para explicar la relación entre el tiempo y la edad, recogen los datos en una figura ⁽³⁶⁾ con

intervalos de un año que presenta una forma de U. Se obtiene que el tiempo de carrera más bajo entre estos corredores es a los 27 años (149 ± 14 min) para los hombres y a los 29 años (169 ± 17 min) para las mujeres. Con edades inferiores se aumentaban estas marcas a un ritmo de $4.4 \pm 4.0\%$ por año en los hombres y $4.4 \pm 4.3\%$ por año en las mujeres. Posterior a la edad de 27 años en hombres y 29 años en mujeres, el tiempo de carrera aumentó en un promedio de $2.4 \pm 8.1\%$ por año en hombres y $2.5 \pm 9.9\%$ por año en mujeres. Cabe destacar, que a pesar del aumento progresivo de las marcas de carrera después de la edad óptima de rendimiento el tiempo medio de carrera entre los participantes escogidos fue significativamente mayor en corredores de 42 años o más en el caso de los hombres, y 40 años o más en mujeres. Por último, llama la atención que los corredores de 18 años presentan un rendimiento similar a los corredores de 55-60 años, esto es tanto en hombres como mujeres ⁽³⁶⁾.

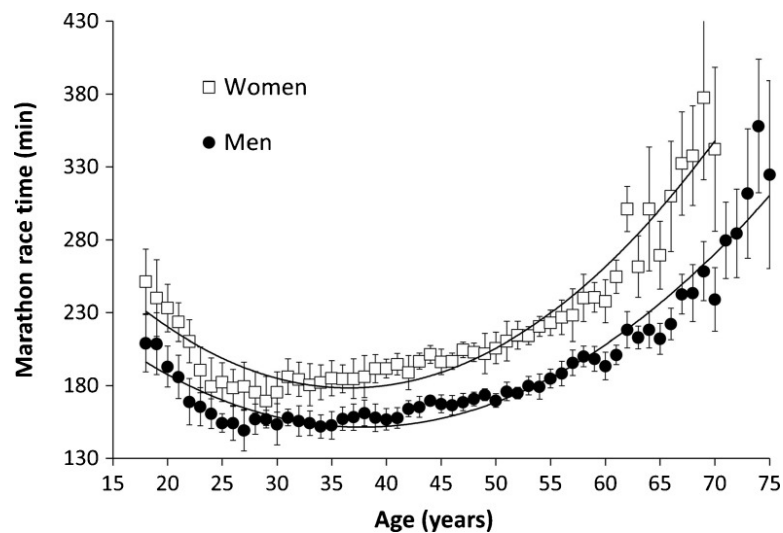


Figura 6. Tiempo promedio de carrera de maratón de los diez mejores atletas masculinos y femeninos según su edad. Los valores son medias \pm SD para las carreras de 2010 y 2011 en el maratón de la ciudad de Nueva York. $R^2 = 0.92 / y = 0.1146 x^2 - 8.6553 x + 314.85$ para los hombres. $R^2 = 0.92 / y = 0.1519 x^2 - 11.12 x + 381.87$ para las mujeres ⁽³⁶⁾.

También se trata en este estudio las diferencias dependientes del sexo. La diferencia sexual más baja se obtuvo a los 29 años ($10.2 \pm 5.5\%$). Entre los 18 y 57 años la diferencia de sexo se mantuvo estable en $\sim 18,7 \pm 3,1\%$. A partir de los 57 años, se da un aumento progresivo de $28.2 \pm 3.2\%$ a los 65 años y a $43.9 \pm 19.8\%$ a los 70 años ⁽³⁶⁾.

La relación entre el rendimiento de resistencia en una carrera de maratón y las edades de los participantes fue en forma de U. Hay un rango en donde el rendimiento es máximo en el maratón y este pequeño rango probablemente sea antes de los 30 años de edad. Por lo

tanto, los corredores de maratón deben programar su entrenamiento a largo plazo para obtener un rendimiento máximo durante los últimos 20 años.

La presente investigación presenta rangos de edad de un año e incluye todas las edades de participantes en la maratón. Existe una relación entre el rendimiento de resistencia de maratón y la edad del participante es en forma de U, lo que indica que hay un rango de edad pequeño en donde el rendimiento es máximo. Es decir, tanto antes como después de ese intervalo el rendimiento en las carreras de resistencia disminuye. El $VO_{2máx}$ se ve afectado por el envejecimiento, mientras que el umbral lactato y el porcentaje de $VO_{2máx}$ no se ven afectados ⁽³⁷⁾.

Para establecer una relación entre la mejora de las marcas y el patrón de pisada, hemos seleccionado el artículo ya mencionado de Ogueta-Alday et al ⁽²¹⁾. En este estudio se analiza de forma sistemática los patrones de pisada de los distintos grupos mencionados anteriormente (G1, G2, G3, G4). Esto viene representado en la siguiente figura 7 ⁽²¹⁾:

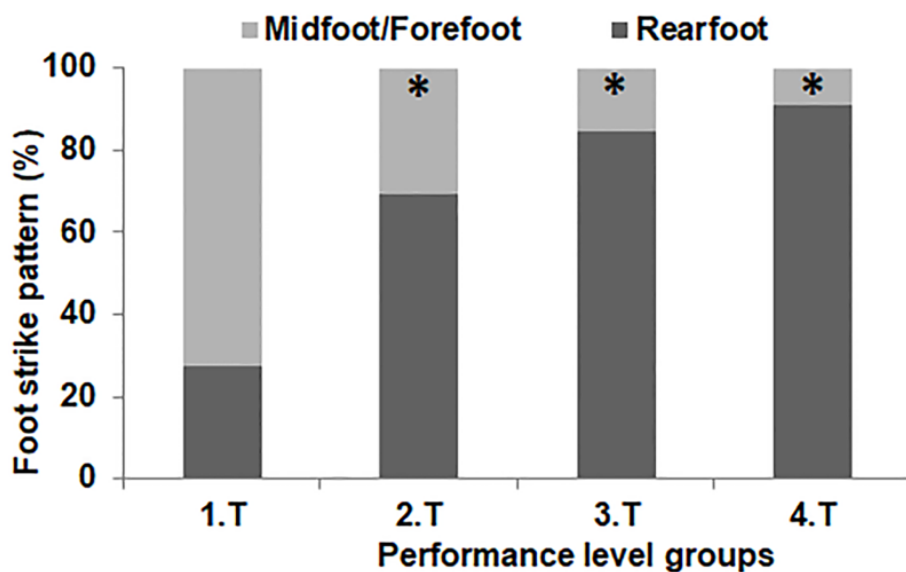


Figura 7. Rendimiento de los corredores en base al patrón de pisada (antepié o retropié) ⁽²¹⁾.

Como podemos observar, los corredores con mejor rendimiento (G1) ejecutaban la carga de pisada con un mayor porcentaje repartido entre el retropié y el antepié. Mientras vemos que a medida que aumenta el porcentaje de pisada con el retropié, el rendimiento empeora de manera progresiva. Los participantes de mayor nivel adoptan con mayor frecuencia los patrones de ataque del antepié y corren a velocidades de carrera más altas, lo que implica diferencias en las variables espaciotemporales. No obstante, se deben

estudiar porque las variables espaciotemporales a la hora de correr son tan consistentes cuando la velocidad de carrera y el patrón de pie son similares.

En el artículo de MJ Joyner et al ⁽⁴⁾, muestra las características ideales de las que debería de disponer el corredor capaz de batir la marca de las 2 horas de maratón. Evaluando a los 50 mejores corredores de larga distancia de la actualidad, se observa que 41 de ellos son de origen keniano o etíope. Además, se recalca la importancia de la altura y el peso, pues estos corredores presentan una altura de 170 ± 6 cm y un peso de 56 ± 5 kg. (estos valores tienen un efecto directo en la mejora del $VO_{2m\acute{a}x}$). En cambio, existen menos evidencias que relacionen una baja estatura con una mejor economía de carrera.

5. CONCLUSIONES

- Resulta de vital importancia el estudio de manera individualizada de la cantidad y calidad de CH y grasas que precisa el atleta de maratón tanto antes como durante el ejercicio. Igual de importante es la hidratación, previa y durante la competición, recomendando bebidas con contenido en sodio.
- Aunque las dietas con índice glucémico bajo suponen una disminución del peso corporal, se precisa de más amplios estudios sobre las ventajas que suponen para un corredor este tipo de dietas, frente a aquellas con un índice glucémico moderado.
- Las variables fundamentales de entrenamiento que determinan el rendimiento en una carrera de maratón son la intensidad del entrenamiento y la altitud a la que se realice, así como comenzar con la actividad a edad temprana. Además, se recomienda realizar *entrenamiento cruzado* para la preparación de cada prueba.
- La recuperación de la capacidad aeróbica y del dolor muscular tras la maratón, siempre y cuando no exista factor lesivo, se consigue en menos de 7 días.
- Los marcadores bioquímicos que sugieren lesión muscular, disminución de la función hepática, hemólisis en sangre y disminución temporal de la función renal, se hacen más notables en carreras de más larga duración que la maratón.
- Los corredores de larga distancia de élite presentan unas características que lo diferencian de los corredores de alto nivel, tanto en la capacidad aeróbica como en mediciones antropométricas, volumen de entrenamiento y años de experiencia. Sin embargo, se necesitaría un mayor número de estudios sobre las diferencias entre ellos respecto a $VO_{2máx}$, coste de carrera y fracción sostenible de carrera.
- Se han de tener también en cuenta de cara a maximizar el rendimiento otros factores como la edad, la raza, el sexo, patrón de pisada, altura y peso del corredor, entre otros.

6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Las limitaciones de esta revisión han sido, en primer lugar, una muestra pequeña, ya que en ciertos estudios el número de corredores fue reducido, incluso algunos de ellos únicamente contaban con la participación de un corredor, siguiendo los criterios de exclusión, dichos artículos no han sido añadidos a esta revisión. En segundo lugar, en algunos aspectos analizados no hemos encontrado suficientes artículos para contrastar la información, tal es el caso de la importancia de la pisada en la carrera de maratón. En tercer lugar, muchos de los artículos que se han encontrado trataban parámetros de manera muy específica, tal como puede ser el efecto de cierta sustancia o alimento respecto al rendimiento del corredor. Además, los resultados y conclusiones obtenidos de estos estudios resultaron ser poco concluyentes. También, se han encontrado en varias ocasiones, dificultad para encontrar el texto completo de ciertos artículos. Se han encontrado por otro lado, varios artículos que resultarían de interés para esta revisión, pero debido a que sus fuentes no cumplían con una evidencia científica clara no se han incluido finalmente.

7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Ante las limitaciones anteriormente mencionadas, se exponen ciertas propuestas de estudio con el fin de mejorar las conclusiones de esta revisión bibliográfica. Entre ellas, una mayor investigación de ciertos parámetros que afectan al rendimiento del corredor de larga distancia, así como incluir en estos estudios a participantes provenientes de distintas nacionalidades. Cabe destacar que, aunque se obtengan conclusiones que puedan servir de ayuda a los corredores de manera generalizada, resulta de gran importancia el análisis de manera individualizada del corredor con el fin de mejorar su rendimiento. Se propone así un mayor estudio respecto a la especificidad que presentan los corredores. También, se sugiere contar con una amplia muestra de corredores para obtener una mayor evidencia.

8. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Ogueta-Alday A, García J y col. Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo. RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte, vol. XII, núm. 45, 2016, pp. 278-308. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/710/71046278006.pdf>
- 2) Association of Athletics Federations - IAAF. Disponible en: <https://www.iaaf.org/disciplines/road-running/marathon>. Acceso 04/13, 2018.
- 3) Heródoto VI, 105-106. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Marat%C3%B3n#cite_note-2 Acceso 04/13, 2018.
- 4) M Joyner, JR Ruiz, A Lucia. The two-hour marathon: who and when? Journal of Applied physiology, vol. 110, 1, enero 2011, pp. 275-277. Disponible en: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00563.2010>
- 5) Olympic Games Official Page. Disponible en: <https://www.olympic.org/athletics/marathon-men> Acceso 04/13, 2018
- 6) Official Page of the World Marathon Majors. Disponible en: <https://www.worldmarathonmajors.com/races/berlin/>
- 7) Wilmore JH, Costill DL. Fisiología del Esfuerzo y del Deporte. 6ª ed. Editorial Paidotribo; 2010.
- 8) Lopategui CE. Funcionamiento muscular durante el ejercicio. Universidad Interamericana de PR. 2007.
- 9) Koolman J, Röhm KH. Bioquímica Humana. Texto y Atlas. 4ª ed. Madrid: Panamericana; 2012.
- 10) Cowley E, Marsden J. The effects of prolonged running on foot posture: a repeated measures study of half marathon runners using the foot posture index and navicular height. Journal of Foot and Ankle Research, vol. 6, 20, mayo 2013 (PUBMED). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3668212/>
- 11) Murray R, Bender D y col. Harper Bioquímica Ilustrada. 29ª ed. Editorial McGraw-Hill; 2013.
- 12) González Brito A. Fisiología de la Actividad Física y del Deporte. 2015. Teoría impartida en el Grado de Fisioterapia de Universidad de La Laguna.

- 13) Dalla VL, Traversi E, Porta A, Lucini D, Pagani M. On site assessment of cardiac function and neural regulation in amateur half marathon runners. *Open Heart*. 2014;1(1). (PUBMED). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4189300/>
- 14) Merí À. *Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte*. 1ª ed. Madrid: Panamericana; 2005.
- 15) Rapoport BI. Metabolic Factors Limiting Performance in Marathon Runners. *PLOS Computational Biology* 2010; 6(10). Disponible en: <http://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1000960#s2>
- 16) Olivos C, Cuevas A, Álvarez V, Jorquera C. Nutrición para el entrenamiento y la competición. *Revista Médica Clínicas Las Conde* 2012; 23(3) 253-261. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0716864012703085>
- 17) Jeukendrup A. Nutrition for endurance sports: Marathon, triathlon, and road cycling, *Journal of Sports Sciences*, 2011; 29, 91-99. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2011.610348?scroll=top&needAccess=true>
- 18) Urdampilleta A, Armentia I y col. La fatiga muscular en los deportistas: métodos físicos, nutricionales y farmacológicos para combatirlos. *Archivos de Medicina del Deporte* 2015; 32(1):36-43. https://www.researchgate.net/publication/281927403_Muscle_fatigue_in_athletes_Physical_nutritional_and_pharmacological_methods_for_improving_recovery
- 19) Fredericson, M, Moore T. Core stabilization training for middle-and long-distance runners. *New Studies in Athletics*, 2005 20(1), 25-37. Disponible en: <https://gse.com/entrenamiento-de-estabilizacion-para-corredores-de-medio-fondo-y-fondo-1555-sa-p57cfb27228723>
- 20) Dias A, Hespanhol C y col. What are the Main Running-Related Musculoskeletal Injuries? *Journal of Sports Medicine*, 2012: vol 42, 10, 891–905. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03262301>
- 21) Ogueta-Alday A, Morante JC y col. Similarities and differences among half-marathon runners according to their performance level. *PLOS ONE Journal*, enero 2018: 13(1). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29364940>

- 22) Gómez JM, Ogueta-Alday y col. Predictive Variables of Half-Marathon Performance for Male Runners. *Journal of Sports Science and Medicine*: 2017;16, 187-194. PUBMED. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28630571>
- 23) Tam E, Rossi H y col. Energetics of running in top-level marathon runners from Kenya. *European Journal of Applied Physiology* 2012, Volume 112, 11, 3797–3806. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00421-012-2357-1>
- 24) William O. Roberts. Can Children and Adolescents Run Marathons?. *Sports Med*; 2008; 37 (4-5). Disponible en: <https://g-se.com/pueden-los-ninos-y-adolescentes-correr-maraton-1324-sa-w57cfb271f1890>
- 25) Tanda G, Knechtle B. Effects of training and anthropometric factors on marathon and 100 km ultramarathon race performance. *Open Access Journal of Sports Medicine*. 2015;6:129-136. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4425319/>
- 26) Maughan R, King D y col. Dietary supplements. *Journal of Sports Sciences*; 2007; 22:95-113. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0264041031000140581>
- 27) Tan PL, Tan FH, Bosch AN. Assessment of Differences in the Anthropometric, Physiological and Training Characteristics of Finishers and Non-finishers in a Tropical 161-km Ultra-marathon. *International Journal of Exercise Science*. 2017;10(3):465-478. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5609674/>
- 28) Burke LM. Nutrition Strategies for the Marathon. Fuel for Training and Racing. *Sports Med*. 2007; 37 (4-5): 344-347. Disponible en: <https://g-se.com/estrategias-nutricionales-para-el-maraton-combustible-para-el-entrenamiento-y-las-competencias-1753-sa-p57cfb27247d2d>
- 29) Lukas Y y col. Drinking Behaviors of Elite Male Runners During Marathon Competition. *Clinical Journal of Sport Medicine*: Mayo 2012, 22(3), 254-261. Disponible en: https://journals.lww.com/cjsportsmed/Abstract/2012/05000/Drinking_Behaviors_of_Elite_Male_Runners_During.9.aspx
- 30) Krzysztof D, Zawieja E y col. Effects of Low Versus Moderate Glycemic Index Diets on Aerobic Capacity in Endurance Runners: Three-Week Randomized Controlled

Crossover Trial. *Nutrients* 2018, *10*(3), 370. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2072-6643/10/3/370/htm>

31) Wong SH, Siu PM, Lok A, Chen YJ, Morris, J. Lam CW. Efecto del índice glucémico de las comidas de carbohidratos previas al ejercicio en el rendimiento de carrera. *EUR. J. Sport Sci.* 2008, *8*, 23-33. PubMed.

32) Chen, YJ; Wong, SH; Wong, CK; Lam, CW; Huang, YJ; Siu, PM Efecto de las comidas antes del ejercicio con diferentes índices de glucemia y cargas sobre las respuestas metabólicas y la carrera de resistencia. *En t. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2008, *18*, 281-300. PubMed.

33) Takayama F, Aoyagi A y col. Effects of Marathon Running on Aerobic Fitness and Performance in Recreational Runners One Week after a Race. *Journal of Sports Medicine* 2017, *6* (Hindawi). Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/jsm/2017/9402386/abs/>

34) Shin K-A, Park KD, Ahn J, Park Y, Kim Y-J. Comparison of Changes in Biochemical Markers for Skeletal Muscles, Hepatic Metabolism, and Renal Function after Three Types of Long-distance Running: Observational Study. *Bianco. A, ed. Medicine.* 2016;95(20). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4902411/>

35) Clemente VJ. Use of bioimpedanciometer as predictor of mountain marathon performance. Disponible en: <http://abacus.universidadeuropea.es/handle/11268/6342>

36) Lara B, Salinero JJ, Del Coso J. The relationship between age and running time in elite marathoners is U-shaped. *Age.* 2014;36(2):1003-1008. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4039284/>

37) Quinn TJ, Manley MJ, Aziz J, Padham JL, MacKenzie AM. Aging and factors related to running economy. *J Strength Cond Res.* 2011; *25* (11): 2971 - 2979. (PUBMED). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21982960>