



Facultad de  
Ciencias de la Salud  
y del Deporte - Huesca  
Universidad Zaragoza

# LA GENÓMICA NUTRICIONAL EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

Grado en Nutrición Humana y Dietética

TRABAJO FIN DE GRADO

**Autora:** Ana Cardiel Naval

**Tutora:** Patricia Meade Huerta, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular y Celular. Universidad de Zaragoza

**Fecha de entrega:** 26 de noviembre de 2015



## **RESUMEN**

La diversidad del rendimiento deportivo está determinada por una serie de factores, tanto biológicos como ambientales. Con los recientes avances en el mundo de la genética, se ha demostrado que el perfil genético individual define características clave en un deportista, como las capacidades musculares, el metabolismo energético y la respuesta a la nutrición deportiva. A su vez, la importancia de la interacción genes – nutrientes es cada vez más evidente, y en el campo del rendimiento deportivo ha dado paso al desarrollo de tests genéticos y a la aplicación de la nutrición personalizada. El objetivo del presente trabajo es estudiar los avances de la nutrigenómica en el rendimiento deportivo y analizar la oportunidad que brindan los tests genéticos. Así, se realizará una revisión de los estudios científicos más destacados, publicados en los últimos años, que han aportado nuevos conocimientos en el área de la genética nutricional del deporte.



# ÍNDICE

I. Lista de abreviaturas	6
II. Glosario	9
III. Introducción	11
IV. Justificación	13
V. Objetivos	13
VI. Metodología	15
VII. 1. Nutrición para el entrenamiento y la competición	17
VIII. 2. Nutrigenómica en el rendimiento deportivo	25
2.1 Interacción genes – nutrientes	27
2.2 Genes implicados en el rendimiento deportivo	30
2.3 Ayudas ergogénicas	36
IX. 3. Los tests genéticos y el desarrollo de la nutrición personalizada	39
X. Conclusiones	45
XI. Bibliografía	47



## LISTA DE ABREVIATURAS

A: adenina

ADN: ácido desoxirribonucleico

ATP: adenosín trifosfato

BP: pares de bases (*base pair*)

C: citosina

G: guanina

KO: knockout



## GLOSARIO

Fenotipo: expresión de la información genética de un individuo condicionada por el ambiente.

Genoma: conjunto de genes de un organismo.

Homocigoto: respecto a un gen, situación en la que los dos alelos que lo codifican contienen la misma información para un carácter.

Knockout: en experimentación, un ratón knockout es aquel al que se le ha suprimido la expresión de un gen mediante ingeniería genética.

Metaboloma: conjunto de metabolitos de un organismo.

Proteoma: conjunto de proteínas de un organismo.

Sobrentrenamiento: fenómeno por el que el rendimiento de un deportista disminuye, a pesar de que el individuo siga entrenando.



## INTRODUCCIÓN

El rendimiento deportivo se define como la capacidad de un deportista para optimizar su actuación mediante el entrenamiento y el aprovechamiento de otros recursos, de manera que su productividad deportiva sea máxima.

Actualmente es aceptado que la nutrición es un factor clave para incrementar el rendimiento deportivo, equiparable al entrenamiento. Existen diferentes recomendaciones dietéticas para cada una de las etapas de la actividad deportiva, basadas en el tipo de deporte que se realiza. El objetivo es optimizar el aprovechamiento de nutrientes como sustrato energético además de la recuperación de las reservas durante las etapas posteriores al entrenamiento o la competición.

La genómica nutricional se define como el estudio de las interacciones funcionales de los alimentos y sus componentes con el genoma a nivel molecular, celular y sistémico, con el objeto de prevenir o tratar enfermedades a través de la dieta. Una de las vías de estudio que incluye es la nutrigenómica, encargada del estudio de la influencia de los nutrientes, o la falta de estos, sobre la expresión de genes involucrados en una gran variedad de procesos celulares, que incluyen transporte celular, mecanismos de transducción de señales, transcripción y replicación del ADN. Sucede que algunos de estos genes están implicados, en distinta medida, en el rendimiento deportivo, y en las capacidades de un individuo para competir en uno u otro deporte a alto nivel.

Buscando la aplicación de estos nuevos conocimientos y con el auge en el desarrollo de los tests genéticos y la nutrición personalizada, han aparecido los tests genéticos para medir la capacidad deportiva, especialmente diseñados para determinar la aptitud deportiva de un sujeto, su predisposición a sufrir lesiones o el tipo de deporte que resulta óptimo para él.

El planteamiento de este trabajo consiste en mostrar la importancia de la influencia de la nutrición y el perfil genético de los deportistas sobre el rendimiento deportivo, así como la utilidad de los tests genéticos aplicados al deporte, evaluando la información científica disponible.



## JUSTIFICACIÓN

Con la creciente tecnificación del deporte de competición surge, más que nunca, la necesidad de encontrar una vía con la que destacar en el ámbito deportivo. Esto se puede conseguir conociendo la información genética, lo que permitiría mejorar el rendimiento deportivo hasta el momento, o aprendiendo a identificar las estrategias y el deporte para el que genéticamente se está predispuesto.

El presente trabajo busca aunar los avances en el mundo de la genética y la nutrición deportiva, ofreciendo a la vez dos herramientas clave en la mejora del rendimiento deportivo. Mediante la revisión de bibliografía sobre genética, nutrición y deporte, este trabajo pretende recopilar los avances actuales para explicar por qué crear recomendaciones que engloben genética y nutrición puede mejorar el rendimiento de un deportista.

## OBJETIVOS

### **Objetivo principal**

El objetivo principal de este trabajo es realizar una revisión de los conocimientos actuales sobre la relación entre la genética y el rendimiento deportivo.

### **Objetivos secundarios**

Dar a conocer la importancia de la nutrición en la práctica deportiva, explicando sus usos en distintas circunstancias.

Recopilar los genes que, con más evidencia, tienen influencia en la aptitud de un sujeto para practicar un deporte de forma profesional.

Describir el campo de actuación de la nutrigenómica, incluyendo avances recientes como los tests genéticos y la nutrición personalizada.



## **METODOLOGÍA**

En base a los objetivos planteados, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de estudios científicos recientes publicados en revistas científicas de interés general y de interés particular en el área de la nutrición, consultando diferentes bases de datos actualizadas nacionales e internacionales, principalmente PubMed (Medline, National Library of Medicine, NIH, EE UU), SciELO (Scientific Electronic Library Online, Brasil) e Ibecs (Índice Bibliográfico Español en Ciencias de la Salud, España).

Se seleccionaron varios artículos de revisión recientes (2002-2015) de cada uno de los apartados, además fueron revisados y analizados artículos científicos originales que permitieron destacar los contenidos más importantes de cada uno de los temas estudiados.

El criterio de selección del material incluido en el trabajo fue relativo al grado de evidencia científica de los artículos de revisión y de los artículos originales, y los criterios personales de la tutora y la autora del trabajo.



1.

---

# NUTRICIÓN PARA EL ENTRENAMIENTO Y LA COMPETICIÓN

---

INTRODUCCIÓN

LA NUTRICIÓN DEPORTIVA Y LOS TIPOS DE DEPORTE

TIPOS DE DIETAS EN NUTRICIÓN DEPORTIVA

NOVEDADES Y OTRAS PRÁCTICAS EN LA NUTRICIÓN DEPORTIVA

CONCLUSIÓN



# NUTRICIÓN PARA EL ENTRENAMIENTO Y LA COMPETICIÓN

## Introducción

Debido al planteamiento del trabajo, se consideró importante empezar su redacción con un apartado que explicara el papel de la nutrición en el deporte, ya que, como se ha indicado anteriormente y se reafirma en el presente apartado, la pauta dietética supone un apoyo esencial en la mejora del rendimiento deportivo.

## La nutrición deportiva y los tipos de deporte

La nutrición deportiva es la rama de la nutrición encargada de diseñar patrones alimenticios para potenciar y complementar la actividad física, que además deben ser equilibrados, variados y completos.

Con el paso de los años y el avance de los estudios, se ha observado que la nutrición es un factor clave para incrementar el rendimiento deportivo, equiparable al entrenamiento. La práctica de deporte es un proceso que exige regularidad y que tiene distintos períodos, y en cada uno de ellos se puede adaptar la pauta dietética para optimizar el aprovechamiento de nutrientes como sustrato energético. Así, se elaboran recomendaciones dietéticas durante el entrenamiento, antes de la competición, durante la competición y después de la competición, a modo de recuperación.

A pesar de la elevada diversidad de deportes y a las evidentes diferencias entre ellos, todos encuentran un punto en común: la necesidad de un sustrato energético para producir la energía necesaria y llevar a cabo la actividad. Para que la pauta nutricional sea la idónea para cada deporte es necesario entender por qué vía metabólica se obtiene la energía en cada caso, y trabajar en base a ello. Se pueden clasificar los deportes en deportes de fuerza y de resistencia. Los deportes de fuerza o anaerobios son aquellos en los que el atleta precisa energía rápida en un período corto de tiempo, caracterizados por el uso de fibras musculares tipo II (o blancas, rápidas) y por la obtención de energía por medio de ATP, fosfocreatina y sistema ácido láctico, con metabolismo anaeróbico. Ejemplos de estos tipos de deporte serían los deportes de sprint, como carreras cortas de atletismo, o de fuerza propiamente dicha, como la halterofilia. Los deportes de resistencia o aerobios necesitan fibras musculares tipo I (rojas o lentas) que son más resistentes a la fatiga, y utilizan el sistema oxidativo como fuente de energía, con metabolismo aeróbico. Entre ellos están deportes con pruebas de larga duración, como ciclismo, maratón o natación<sup>1,2</sup>.

## **Tipos de dietas en nutrición deportiva**

Se puede definir al deportista como un individuo con necesidades energéticas elevadas. Para diseñar una dieta que se ajuste a cada persona, es esencial calcular de la forma más precisa posible el gasto energético total a lo largo del día, con el fin de cubrir esta cantidad. Además, como ya se ha mencionado, se tendrán en cuenta el tipo de deporte y el momento de la actividad deportiva<sup>1,2</sup>.

1. Descanso: en esta fase, el deportista se centra en recuperarse de la fatiga que le haya podido causar el curso deportivo. Es el momento del año idóneo para ajustar su peso al ideal del deporte, ya sea manteniéndolo, aumentándolo si durante la temporada se ha perdido o disminuyéndolo, por ejemplo en deportes con categorías por peso. Es importante que, sea cual sea el objetivo de peso, se respete una dieta variada y equilibrada, sin suprimir unos grupos de alimentos (como podrían ser los hidratos de carbono), ni aumentar en exceso otros (por ejemplo las proteínas) y asegurando un correcto aporte de micronutrientes. También es importante evitar la pérdida de masa muscular, por lo que resulta interesante incluir algún tipo de ejercicio físico adecuado a la etapa de descanso, a modo de mantenimiento.

2. Entrenamiento: el objetivo principal de este período es mejorar la capacidad de adaptación del organismo al esfuerzo. Nutricionalmente, se debe procurar que el deportista aumente las tomas, no ayune más de 3 o 4 horas y adquiera buenos hábitos con respecto a las competiciones, como por ejemplo, realizar una comida calórica mínimo dos horas antes del ejercicio, y unos 30 minutos antes, tomar sólo pequeñas raciones y de fácil absorción. La distribución de macronutrientes se realiza de tal forma que se mantenga el peso ideal y se asegure un balance energético equilibrado. Si se desea incluir algún cambio respecto a las competiciones, como estrategias de sobrecarga de glucógeno, o el uso de alguna ayuda ergogénica, se recomienda probarlo durante esta etapa y ver cómo responde el organismo y el rendimiento ante estas novedades.

3. Competición: el periodo de competición engloba desde una semana antes de la competición hasta su finalización.

Una semana antes de la competición: se implanta una dieta que asegure las reservas hídricas, de ATP, de fosfocreatina y de glucógeno completas. Además, el deportista debe llegar descansado a la prueba, por lo que no se deben realizar entrenamientos muy exigentes los días previos.

Día previo a la competición: este día resulta clave para completar las reservas de glucógeno y de agua en el organismo. Por ello, es vital que el atleta cumpla con las tomas aconsejadas y consuma alimentos de fácil digestión, evitando en la medida de lo posible alimentos ricos en fibra, crudos, con cafeína o nuevos.

Día de la competición: a falta de pocas horas para el esfuerzo, es importante tener niveles normales de glucemia y de hidratación. Si la prueba es por la mañana, es importante compensar el ayuno nocturno con el desayuno, siempre tomándolo 2 horas antes de la competición como mínimo, para evitar problemas digestivos. Desde las 2 horas previas hasta los pocos minutos antes de iniciar la prueba, se recomienda realizar tomas pequeñas y que no sean de alto índice glucémico, ya que podrían provocar un pico de glucemia indeseado.

Durante la competición: se considera necesaria una estrategia nutricional durante la competición cuando ésta dura más de 45 minutos. En estos casos, el objetivo principal es frenar el agotamiento de los depósitos de glucógeno y mantener la glucemia. Para ello, es muy común, además de cómodo para el atleta, incluir los hidratos de carbono y las sales en la bebida, ya que así mantiene el balance hídrico al mismo tiempo que se nutre.

Post-competición: este lapso de tiempo incluye el momento inmediato a la finalización de la prueba y la toma principal más próxima tras la prueba.

- Inmediato: con el objetivo de rehidratarse y replecionar poco a poco las reservas de glucógeno, es recomendable realizar pequeñas tomas, no demasiado calóricas, que sirvan como tentempié hasta la siguiente toma, algo más calórica.
- Posterior: a pesar de que esta toma debe ser más calórica que los tentempiés, no debe ser excesiva. Su objetivo es alcanzar el equilibrio hidromineral y restablecer las reservas de glucógeno sin sobrecargar los sistemas de eliminación del organismo.

### **Novedades y otras prácticas en la nutrición deportiva**

La nutrición deportiva es una ciencia activa, en la que se siguen investigando nuevas vías de actuación, siempre en pos de mejorar la evidencia actual. Existen dos tendencias que llaman la atención, bien por suponer una novedad, o bien por cambiar totalmente la recomendación nutricional para deportistas.

- Enjuague con hidratos de carbono.

El inicio de esta técnica se debe al equipo de Jeukendrup (2004), que desarrolló un estudio en el que un grupo de ciclistas realizaba una contrarreloj de una hora de duración, llevando a cabo el enjuague durante cinco segundos cada 1/8 de la prueba completado. El resultado fue que los deportistas reducían en un 2.9% su tiempo en completar la prueba<sup>3</sup>.

La idea base que respalda esta práctica es que, en muchas ocasiones, la ingesta de hidratos de carbono durante el ejercicio da lugar a molestias gastrointestinales, totalmente inoportunas si se está compitiendo. De este modo, al limitarse a un enjuague, no es necesaria la digestión, la cual implica destinar parte del flujo sanguíneo y de la energía al aparato digestivo, sino que se produce una estimulación de los receptores bucales, provocando la activación de zonas cerebrales relacionadas con la motivación durante el ejercicio<sup>4</sup>. La evidencia actual solo hace referencia al uso de esta estrategia en deportes de resistencia, por lo que el campo de investigación en deportes de fuerza o potencia sigue abierto.

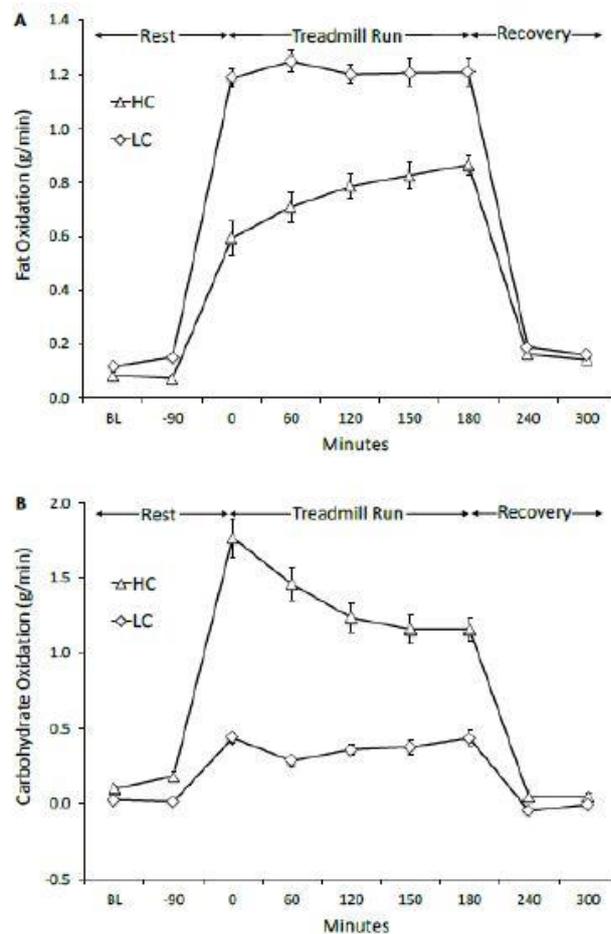
- Dieta alta en lípidos.

Como se ha señalado anteriormente, la recomendación nutricional más generalizada para el mundo del deporte es el seguimiento de una dieta alta en hidratos de carbono. Sin embargo, esto hace plantearse nuevas cuestiones, entre ellas, ¿por qué no seguir una dieta alta en grasas?

La justificación que se puede encontrar tras esta pregunta es que, al seguir una dieta con un alto contenido lipídico, serían las grasas el macronutriente que supusiera el principal sustrato energético. Este cambio se debe al aumento de las reservas intramusculares de triacilglicerol, que inducen la acción de genes responsables de la oxidación lipídica. El uso de lípidos como primer sustrato energético podría asegurar una mayor duración de las reservas hepáticas y musculares de glucógeno, lo que sería un factor clave a la hora de retrasar la fatiga, ya que la aparición de ésta depende, en alta medida, del glucógeno muscular. Sin embargo, se ha observado que en las dietas altas en grasas, a menudo las reservas de glucógeno se ven disminuidas, debido a que la ingesta de hidratos de carbono es muy limitada<sup>5</sup>.

Recientemente, un estudio (Volek et al. 2015) ha aportado nuevos resultados sobre este tema. Se compararon dos grupos de diez atletas entrenados, uno de los grupos siguió una dieta alta en hidratos de carbono (%carbohidratos:proteínas:lípidos = 59:14:25) frente al otro grupo, que siguió una dieta baja en hidratos de carbono (10:19:70). Los hallazgos al comparar ambos grupos tras una prueba de 180 minutos al 64% de su VO<sub>2</sub>max fueron mucho más optimistas: el grupo de dieta baja en hidratos de carbono mostró mejor capacidad a la hora de oxidar las grasas

a intensidades de ejercicio elevadas (Fig. 1), y, además, los deportistas no presentaban diferencias en las concentraciones pre-ejercicio de glucógeno muscular ni en el uso de éste durante el ejercicio, ni la síntesis de glucógeno durante la recuperación fue distinta<sup>6</sup>. Es decir, en este estudio se demostró que las adaptaciones de una dieta alta en grasa se asocian con una mayor capacidad para oxidar los lípidos manteniendo concentraciones de glucógeno muscular normales.



**Figura 1.** A: Comparación de la oxidación de grasas entre los dos grupos. B: comparación de la oxidación de hidratos de carbono entre los dos grupos. Adaptado de Volek et al., 2015

## **Conclusión**

En muchas ocasiones, las diferencias entre los resultados obtenidos en un grupo de varios deportistas son mínimas. Como se ha visto, la nutrición resulta un factor esencial para el funcionamiento de un organismo, y es una ayuda al alcance de todos los atletas. Además, este campo sigue en investigación, innovando en las técnicas de suplementación o en los tipos de dietas.

2.

---

# NUTRIGENÓMICA EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

---

INTRODUCCIÓN

INTERACCIÓN GENES – NUTRIENTES

GENES IMPLICADOS EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

AYUDAS ERGOGÉNICAS



# NUTRIGENÓMICA EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

## Introducción

Nuestro genoma determina parte de nuestra predisposición a tener un cierto rendimiento deportivo. Además, el factor ambiental también influye en cómo se exprese este genoma, y en él se recogen el entrenamiento y la dieta. Conociendo el genoma podemos adaptar la alimentación y el entrenamiento para sacar el máximo partido a nuestros genes y optimizar el rendimiento deportivo.

## INTERACCIÓN GENES-NUTRIENTES

### Interacción genes-ambiente

Todas las características corporales están definidas, en primer lugar por el genoma, y en segundo lugar por el ambiente. El genoma es el conjunto de información genética de un individuo. De este modo, un individuo puede contar con una variante u otra de un gen, que, si está activado, codificará su información para la producción de una proteína, que a su vez tendrá una función en el organismo. Sucede que toda esta información no se expresa, sino que cuenta con un filtro que la regula: el ambiente.

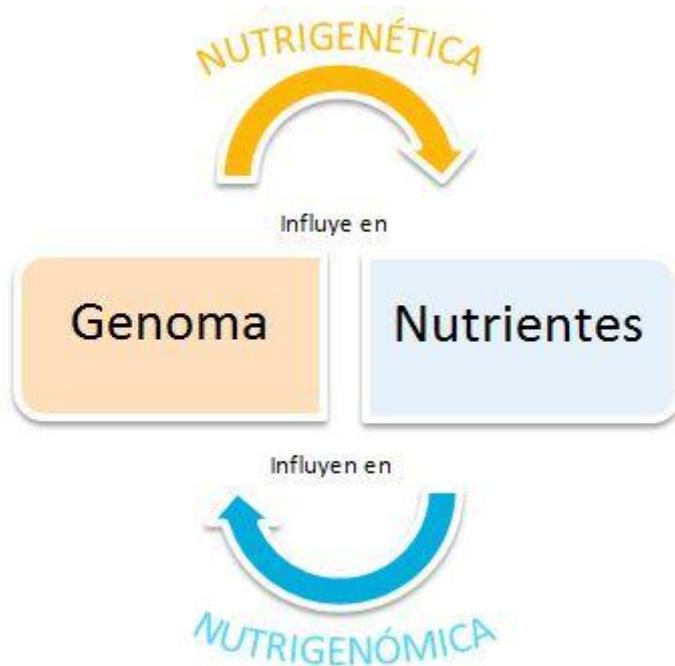
Durante toda la vida, el cuerpo se ve expuesto a distintos factores ambientales, que pueden afectar a la expresión de los genes, modificando el fenotipo. Entre estos factores ambientales se encuentran las toxinas como el tabaco, el ejercicio físico, y, el principal: la alimentación. Todo lo que se ingiere provoca algo en el organismo y tiene un efecto en él, ya sea beneficioso o perjudicial<sup>7</sup>.

### Nutrigenómica y nutrigenética

Respecto a la nutrición, se establece una relación de doble sentido entre los genes y los nutrientes. Por un lado, los nutrientes modulan la expresión génica, siendo la fuente de los compuestos estructurales y funcionales de las células y regulando el funcionamiento de éstas, o actuando como señalizadores celulares o mensajeros. En el sentido contrario, los genes codifican la respuesta del organismo para con los nutrientes, teniendo un papel esencial en las intolerancias alimentarias<sup>7</sup>.

Es cierto que en muchas enfermedades, la carga genética juega un papel decisivo en la aparición y evolución de la dolencia. Sin embargo, en otras enfermedades como la obesidad, la diabetes tipo 2 y la enfermedad cardiovascular, aunque puedan tener relación con los genes<sup>8</sup>, su principal detonante es la nutrición.

Sabiendo todo esto, parece lógico que la nutrición y el estudio de los genes se unan para conocer estas interacciones y actuar en consecuencia. Así surge la Genómica Nutricional, ciencia encargada del estudio de la interacción entre nutrición y genoma, y del resultado de esta interacción (Fig. 2). Se pueden estudiar las variaciones genéticas en la interacción entre dieta y enfermedad, lo que da lugar a la Nutrigenética. En el sentido inverso, se estudian los efectos de los nutrientes en el genoma, el proteoma y el metaboloma, labor de la Nutrigenómica<sup>9</sup>.



**Figura 2.** Relación entre genoma y nutrientes: nutrigenómica y nutrigenética

La Nutrigenómica es la rama de la Genómica Nutricional que se encarga del estudio de la influencia de los nutrientes, o la falta de estos, sobre la expresión de genes involucrados en una gran variedad de procesos celulares, que incluyen transporte celular, mecanismos de transducción de señales, transcripción y replicación del DNA.

La Nutrigenética es la rama de la Genómica Nutricional encargada del estudio de la influencia de las variaciones genéticas en la respuesta del organismo a los nutrientes.

De este modo, conforme aumentan los conocimientos en Genómica Nutricional, aumentan las posibilidades de utilizar tratamientos nutricionales según el genotipo individual, lo que se conoce como nutrición personalizada. Este avance no se limita solo a las enfermedades, sino que se puede ir más allá y ser aplicado, por ejemplo, en deportistas.

Ahondando más en la cuestión tratada anteriormente sobre la interacción genes-nutrientes, se pueden detallar seis acciones de los nutrientes a nivel celular y molecular que explican la influencia de la dieta<sup>9,10</sup>:

1. Actuar como ligandos para la activación de factores de transcripción que favorezcan la síntesis de receptores.
2. Regular la expresión del ARNm.
3. Metabolizarse por vías primarias o secundarias, alterando las concentraciones de sustratos o intermediarios.
4. Influir positiva o negativamente en las rutas de señalización.
5. Regular la actividad enzimática al modificar la concentración de la coenzima.
6. Silenciar fragmentos del ADN por mecanismos epigenéticos, principalmente por metilación de la citosina.

Dentro de las variaciones genéticas que pueden influir en la respuesta del organismo a los nutrientes están los polimorfismos de una sola base (SNP), localizados en el ADN y que consisten en la variación en la secuencia de ADN que afecta a una sola base (adenina, citosina, timina o guanina), modificando la información genética<sup>7</sup>.

## **Conclusión**

Con el nacimiento de la Genómica Nutricional se abre el camino hacia el conocimiento de los procesos que tienen lugar en el organismo cuando se ingieren nutrientes. Estos avances tienen multitud de aplicaciones, tanto en el ámbito de la salud como en las distintas disciplinas deportivas.

## GENES IMPLICADOS EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

Actualmente, la genética constituye un campo de investigación muy amplio, dado que se puede aplicar a innumerables aspectos de la vida. Este interés en comprender cómo influye la genética en diversos campos se ha trasladado también al universo del rendimiento deportivo, y cada día son más los genes estudiados y relacionados con el deporte, o con el deporte y la nutrición<sup>11</sup>.

Dado que el rendimiento deportivo no depende únicamente de un factor, los genes que actúan sobre él no participarán en un único proceso, ni mejorarán todos el mismo aspecto. A continuación se muestra un listado de genes relacionados con el rendimiento deportivo y que intervienen en distintos tipos de procesos, cabe destacar que la mayor parte de ellos tienen relación con el metabolismo de nutrientes, principalmente con el metabolismo de lípidos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Genes relacionados con el rendimiento deportivo

Gen	Proteína
<b>ACTN3</b>	Alfa-actinin-3
<b>ACE</b>	Enzima convertidora de angiotensina I
<b>CKM</b>	Creatina quinasa muscular
<b>IL-6</b>	Interleucina 6
<b>PPAR-<math>\delta</math></b>	Receptor delta activado por proliferadores de peroxisomas
<b>PPAR-<math>\alpha</math></b>	Receptor alfa activado por proliferadores de peroxisomas
<b>APOA1</b>	Apolipoproteína A1
<b>APOA5</b>	Apolipoproteína A5
<b>APOE</b>	Apolipoproteína E
<b>CETP</b>	Proteína plasmática transportadora de ésteres de colesterol
<b>CYP1A2</b>	Citocromo P450, familia 1, subfamilia A, polipéptido 2

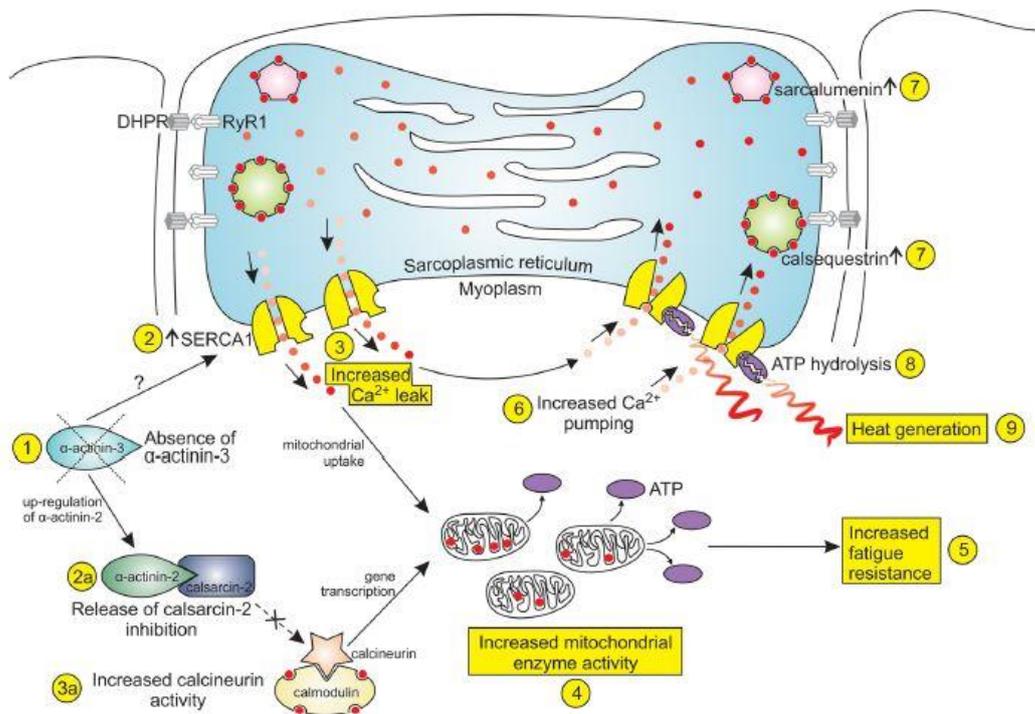
Entre estos genes se encuentran algunos genes que codifican para proteínas presentes en el músculo esquelético, otros para proteínas que participan en el metabolismo lipídico. La función de cada uno de ellos se detalla a continuación, tratando de destacar la relación directa entre alguno de los polimorfismos descritos para estos genes y el rendimiento deportivo.

#### - ACTN3

Este gen codifica información para dar lugar a la proteína alfa-actinin-3<sup>12</sup>. Ésta es una proteína de unión que se expresa en el músculo esquelético y constituye un componente estructural de los discos Z del sarcómero, estabilizando el aparato contráctil del músculo<sup>14</sup>. Debido a un polimorfismo en la posición 1747 del gen (C→T), se genera un cambio en la secuencia de la proteína en el residuo 577 (R577X), convirtiendo el aminoácido arginina en un codón de paro. Esto genera una proteína truncada. Por lo tanto, el gen tiene dos variables: codificante y no codificante. En el rendimiento deportivo, resulta interesante el polimorfismo no codificante, ya que, en ausencia de la proteína, las fibras musculares esqueléticas tienen mayor capacidad aeróbica y un aumento en la expresión de las proteínas mitocondriales, como se observó en ratones knock-out para la proteína alfa-actinin-3<sup>13</sup>. Según los últimos estudios<sup>14,15</sup>, ello supone una ventaja en los deportes de resistencia, y se ha observado que se presenta en mayor proporción en deportistas de élite de actividades de resistencia y que su presencia es mucho menor en deportistas de fuerza y sprint. Esta creencia no ha sido siempre igual, sino que, hace unos años, la tendencia era pensar que este polimorfismo favorecía a los deportistas de sprint<sup>16,17</sup>, llegando a llamarlo el “gen de la velocidad”. No hay que obviar, sin embargo, que cuando la proteína se expresa correctamente porque no existe el polimorfismo, su función favorece la generación de fuerza en actividades explosivas, por lo que resulta deseable en deportes rápidos o de fuerza. De una forma u otra, la evidencia demuestra que la labor de este gen y de la proteína que codifica tiene un papel importante en el rendimiento deportivo<sup>18</sup>.

El polimorfismo no codificante aparece en el 18% de la población de manera homocigota<sup>13</sup>, y se debe a un codón de paro. Además, la falta de esta proteína no produce un fenotipo de enfermedad, sino que parece ser una ventaja evolutiva para habitantes de lugares fríos y con disponibilidad de comida limitada<sup>19</sup> (Fig. 3). Sin embargo, también se ha observado que la falta de esta proteína podría influir en la

debilidad muscular asociada al envejecimiento y en la distrofia muscular, además de ser perjudicial durante la recuperación del sobreentrenamiento<sup>14</sup>.



**Figura 3.** Aclimatación al frío y termogénesis en fibras deficientes en  $\alpha$ -actinina-3: el diagrama muestra los mecanismos por los cuales una pérdida de  $\alpha$ -actinina-3 en las fibras musculares glucolíticas rápidas podría promover la adaptación a ambientes fríos. El aumento de la fuga de  $\text{Ca}^{2+}$  (3), el aumento de la actividad enzimática mitocondrial (4) y el aumento de la resistencia a la fatiga (5), son todos características de las fibras musculares de ratones expuestos al frío prolongado, por lo tanto, se puede decir que la deficiencia en  $\alpha$ -actinina 3 “pre-aclimata” a los músculos a ambientes fríos. Además, el aumento del bombeo de SERCA1 ( $\text{Ca}^{2+}$ -ATPasa) consume ATP y genera calor (9), proporcionando un mecanismo termogénico que también mejoraría la supervivencia al frío. Adaptado de Head et al., 2015.

- ACE

Gen precursor de la enzima convertidora de angiotensina I<sup>12</sup>. Esta enzima cataliza la conversión de la angiotensina I a angiotensina II. La primera evidencia de que los polimorfismos genéticos influyen el rendimiento deportivo en humanos se obtuvo con el gen ACE. El polimorfismo de inserción/delección de ACE (ACE I/D, rs1799752) ha sido relacionado con mejoras en el rendimiento y la duración del ejercicio en varias poblaciones. El alelo I, que representa una inserción de 287 bp, está

asociado con menor actividad de ACE en el suero y en los tejidos, y con una mejora del rendimiento en los deportes de resistencia. La forma eliminada (alelo D) está asociada con una mayor actividad circulatoria y en tejidos de ACE, y con el incremento del rendimiento en deportes que requieren sprint o breves explosiones de fuerza. Sobre la respuesta a la glucosa y la insulina, ACE con fenotipo II mejora la sensibilidad a la insulina<sup>20</sup>.

- CKM

Gen que codifica la proteína creatina quinasa muscular. Esta proteína participa en la homeostasis energética, además de actuar como marcador en el infarto de miocardio. Además, cataliza la transferencia de un fosfato desde el ATP a otros compuestos, como la creatina fosfato, y está presente en el músculo estriado<sup>12</sup>.

- IL-6

Este gen codifica la proteína interleucina 6, presente en la respuesta inflamatoria<sup>12</sup>. En la bibliografía actual se relaciona con la composición corporal, ya que influye sobre el área cortical del hueso<sup>11</sup>. Respecto al metabolismo, modifica la respuesta a glucosa e insulina, en concreto la tolerancia a la glucosa<sup>21</sup>. También provoca cambios en el colesterol HDL<sup>11</sup>.

- PPAR- $\delta$

Este gen contiene información para formar el receptor delta activado por proliferadores de peroxisomas<sup>12</sup>. Se ha observado relación entre sus funciones y la VO<sub>2</sub>max en deportes de resistencia, y también influye en la respuesta a la insulina, mejorando la sensibilidad hacia ésta. Sobre el metabolismo lipídico, se ha relacionado con la APOA1<sup>11</sup>.

- PPAR- $\alpha$

Este gen codifica para el receptor alfa activado por proliferadores de peroxisomas<sup>12</sup>, que participa en la oxidación de ácidos grasos y el metabolismo lipídico. El polimorfismo localizado en la posición 2528 del gen (G→C) presente en el exon 7, influye en los deportes de resistencia, lo cual podría ser explicado por la asociación que existe entre los genotipos de PPAR- $\alpha$  y la composición de los diferentes tipos de fibra

muscular<sup>22</sup>. Se ha relacionado con deportes de resistencia y, en cuanto a la composición corporal, se ha observado que esta proteína influye en el acúmulo de grasa subcutánea en la parte superior del brazo<sup>11</sup>.

- APOA1

Este gen codifica la apolipoproteína A1, proteína mayoritaria en las lipoproteínas de alta densidad (HDL por sus siglas en inglés). Su función principal es promover la movilización de colesterol desde los tejidos hacia el hígado, para su excreción<sup>12</sup>.

- APOA5

Este gen codifica la apolipoproteína A5, la cual se encarga principalmente del transporte de triglicéridos<sup>12</sup>.

- APOE

A partir de este gen se sintetiza la apolipoproteína E, responsable del transporte de quilomicrones<sup>12</sup>. En relación al metabolismo lipídico, se ha observado que modifica el colesterol sérico y el colesterol HDL<sup>11</sup>.

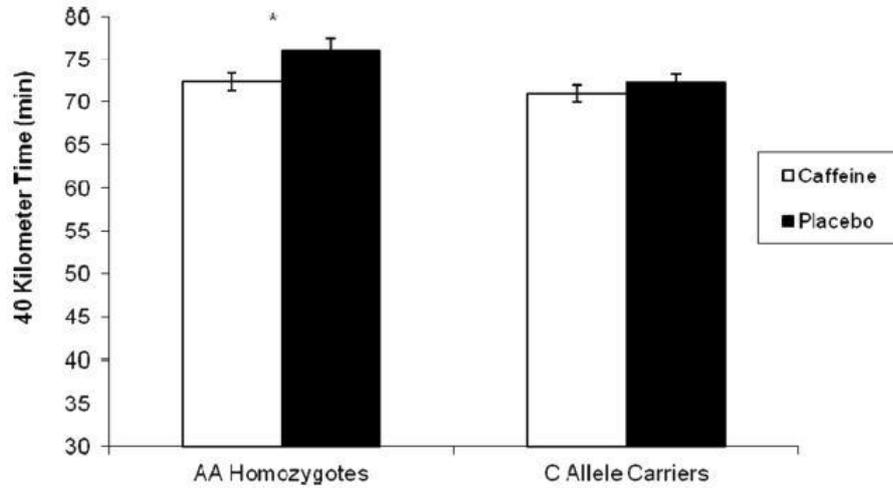
- CETP

Gen que codifica la síntesis de la proteína transportadora de ésteres de colesterol, que transporta los ésteres de colesterol desde lipoproteínas HDL a otras lipoproteínas<sup>12</sup>. Estudios sobre el deporte lo relacionan con el colesterol HDL<sup>11</sup>.

- CYP1A2

Este gen codifica una proteína que forma parte del citocromo P450. Se localiza en la familia 1 y, a su vez, en la subfamilia A<sup>12</sup>. El citocromo P450 tiene un papel fundamental en el metabolismo de la cafeína, que puede ser utilizada como ayuda ergogénica. Un polimorfismo localizado en el intrón 1, posición 734 del gen (C→A) ha sido estudiado con detalle. La variante C se relaciona con un metabolismo de la cafeína más ralentizado, lo que incrementaría el riesgo cardiovascular. Por su parte, en individuos homocigotos AA consumidores de café se ha observado una pérdida de

densidad mineral ósea. Un estudio llevado a cabo en ciclistas profesionales observó que la cafeína provocaba un efecto ergogénico mayor en los individuos homocigotos AA, no así en los portadores del alelo C (Fig. 4). Sin embargo, no puede explicar a qué se debe este efecto prolongado y concluye que probablemente este polimorfismo no sea la única razón por la que la cafeína supone una ayuda ergogénica en ciclistas entrenados<sup>23</sup>.



**Figura 3.** Comparación de la media de tiempo en completar 40 kilómetros entre el tratamiento con cafeína y el placebo en ambos grupos. \*Disminución significativa frente a portadores del alelo C ( $p < 0.05$ ). Adaptado de Womack et al., 2012.

## Conclusión

En el mundo de la competición, cualquier detalle se vuelve importante a la hora de conseguir diferenciarse del resto de deportistas. En varios casos ha quedado demostrada la relación que algunos genes (y ciertos polimorfismos) tienen con la actividad deportiva. Muchos de ellos llevan a cabo mecanismos derivados de la nutrición, lo que afianza la tríada genética, deporte y nutrición en la mejora del rendimiento deportivo.

## AYUDAS ERGOGÉNICAS

Dada la omnipresencia de los nutrientes y, por consiguiente, de los alimentos, en la vida de cualquier ser humano, parece lógico pensar que la nutrición pueda ser un factor clave en el rendimiento deportivo, como ya se ha afirmado anteriormente. Sin embargo, se ha llegado más allá en el estudio de la interacción genes-nutrientes, y algunos de estos nutrientes se han tratado de identificar como ayudas ergogénicas. Una ayuda ergogénica es toda aquella sustancia, material o práctica que se utiliza para mejorar el rendimiento deportivo, interviniendo en el uso o la producción de energía. Este término no se limita a las ayudas de tipo nutricional o farmacológico, sino que se han descrito cinco tipos distintos<sup>1,24</sup>:

- Ayudas mecánicas, como la equipación.
- Ayudas psicológicas, como las técnicas de hipnosis.
- Ayudas fisiológicas, como el dopaje sanguíneo.
- Ayudas farmacológicas, como la cafeína.
- Ayudas nutricionales, como las dietas de sobrecarga de glucógeno.

A continuación se ofrece una explicación de algunas de las ayudas ergogénicas más comunes (el listado completo aparece en la Tabla 2) y que en Australia, un país que cuenta con una legislación muy completa sobre la producción de suplementos, se consideran como “Suplementos tipo A: Suplementos aprobados por brindar una fuente de energía y nutrientes útil y oportuna en la dieta del deportista, o por haberse demostrado en investigaciones científicas que brindan un beneficio en el desempeño cuando se usan de acuerdo con un protocolo específico en una situación determinada”<sup>25,26</sup>:

-Vitaminas antioxidantes C y E: recomendadas para uso en tiempo limitado, frenando la producción de radicales libres y el estrés oxidativo<sup>27</sup>.

-Bicarbonato/citrato: su uso como agentes alcalinizantes retrasa la aparición de fatiga en ejercicios con glucólisis anaerobia (cortos e intensos, varias repeticiones), cuyo resultado es la producción de ácido láctico y la consiguiente acidosis<sup>2</sup>.

-Creatina: resulta útil para atletas de ejercicios breves de gran intensidad, ya que favorece la resíntesis de ATP. Aumenta el nitrógeno total en las células, ya sea aumentando la síntesis proteica o disminuyendo la degradación proteica, permitiendo realizar múltiples

repeticiones con más fuerza. Además, al suplementarla junto a hidratos de carbono, el transporte de creatina a músculo mejora, ya que se produce un aumento de insulina<sup>2,26</sup>.

**Tabla 2.** Suplementos aprobados por el Instituto Australiano del Deporte

Suplementos aprobados por el Instituto Australiano del Deporte (AIS), 2007 <sup>25</sup>
Bebidas para deportistas
Suplementos alimentarios líquidos
Geles para deportistas
Barras para deportistas
Cafeína
Creatina
Bicarbonato/citrato
Antioxidantes: vitamina C, vitamina E
Zinc y vitamina C
Suplemento de vitaminas y minerales
Suplemento de hierro
Suplemento de calcio
Glicerol
Glucosamina

Aunque estas ayudas pueden resultar útiles con un uso adecuado, no se debe olvidar que la fatiga es un mecanismo de defensa del organismo y que es necesaria, ya que advierte de que el músculo no puede mantener la misma intensidad de ejercicio.

## Conclusión

Con el objeto de destacar, se investigan nuevos tejidos, se adquieren nuevos equipamientos o se practican nuevas técnicas de entrenamiento, aunque las ayudas de tipo nutricional son de gran interés: debido al desgaste que conlleva la competición deportiva, se hace evidente la necesidad del uso de distintas técnicas que actúen como ayudas ergogénicas.

Entre ellas se ha probado la utilidad de varios componentes de los alimentos y existen otros muchos que todavía están en proceso de investigación.

3.

---

## LOS TESTS GENÉTICOS Y EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN PERSONALIZADA

---

INTRODUCCIÓN

LOS TESTS GENÉTICOS Y LA NUTRICIÓN PERSONALIZADA

CONCLUSIÓN



# LOS TESTS GENÉTICOS Y EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN PERSONALIZADA

## Introducción

Al combinar el conocimiento del genoma de un individuo mediante test genético, la nutrición más indicada para él y la evidencia sobre genes que influyen en el rendimiento deportivo, se puede tratar de potenciar la actuación de dicho individuo a nivel deportivo. En casos en los que no se busque el rendimiento deportivo sino el estado de salud, los tests genéticos pueden ayudar a comprender si la persona tiene riesgo de sufrir alguna enfermedad, o cuál es la estrategia nutricional que más le conviene.

## Los tests genéticos y la nutrición personalizada

Un test genético es el análisis de diferentes zonas de la secuencia de ADN de un individuo, en las que se busca la presencia o ausencia de un gen concreto o de un polimorfismo, con el fin de diagnosticar una enfermedad, determinar si el individuo es portador de ésta, o si tiene predisposición a sufrirla, o para conocer las características individuales de cada sujeto.

A medida que el campo de la Genómica Nutricional ha avanzado, se ha observado que los tests genéticos podrían ser una herramienta muy útil para determinar intolerancias alimentarias o la tendencia a desarrollar enfermedades que podrían evitarse, en gran medida, adaptando la alimentación a esta información (obesidad, diabetes, hipertensión). De esta forma surge la nutrición personalizada, encargada de diseñar pautas dietéticas específicas para cada individuo, basándose en su genoma, único.

No se debe perder la perspectiva, ya que, como observan Pavlidis et al. (2015) en su metaanálisis, la nutrigenómica es todavía una ciencia en busca de evidencias, y parece ser demasiado pronto para que las empresas pongan a disposición del usuario el análisis genético como un servicio comercial. De los 38 genes que suscitan interés respecto a la nutrición personalizada, muy pocos cuentan con estudios que respalden esta relación, y de esos pocos, la asociación demostrada es débil, ya que está observada en pocos estudios. Esto sucede, por ejemplo, con los genes que se relacionan con la obesidad. El gen ADRA2B tiene un único estudio que lo relaciona positivamente con la aparición de obesidad. Mientras tanto, el gen ADRB3 solo ha obtenido resultados contradictorios<sup>28</sup>. Este hecho no debe ser interpretado como

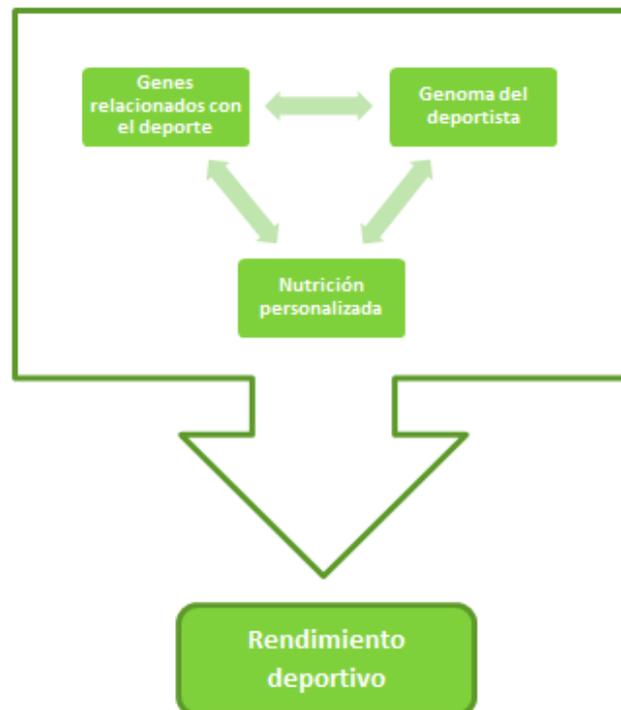
una limitación a la utilidad de la nutrición personalizada, sino como un incentivo para seguir investigando, ya que puede ser un campo prometedor con múltiples aplicaciones.

A su vez, se han desarrollado tests genéticos especialmente diseñados para determinar la aptitud deportiva de un sujeto, su predisposición a sufrir lesiones o el tipo de deporte que resulta óptimo para él. Así es como el mundo del rendimiento deportivo da un paso más: si ya se ha comprobado que la nutrición aplicada al deporte es esencial para asegurar una buena actuación, el papel de la nutrición en los buenos resultados se incrementará al personalizar estas recomendaciones al máximo, sin limitarse a los consejos generalizados.

Sin perder el vínculo con la práctica deportiva, se encuentran los tests genéticos que estudian la tendencia que pueda tener un deportista a sufrir muerte súbita. La muerte súbita es un fenómeno conocido en el mundo deportivo, que sucede cuando una persona aparentemente sana y con un estado de salud óptimo sufre una parada cardíaca. Por lo tanto, este test no sólo tendrá relevancia en la carrera deportiva de la persona, sino que estará altamente relacionado con su salud.

En la búsqueda del consejo que optimice el rendimiento deportivo, deben unirse varias ramas de conocimiento. En primer lugar, la nutrición, pues ya ha quedado demostrada la necesidad de un estado nutricional correcto y continuado en el tiempo, para soportar el esfuerzo. A continuación, el conocimiento en genética sobre los genes que tienen mayor implicación en el deporte, cada vez más estudiados. Y, por último, el estudio del propio genoma para conocer la carga genética relevante, deportivamente hablando, del sujeto. Combinando todos estos avances, se logra una recomendación que tiene en cuenta todos los factores que rodean al deportista (Fig. 5).

Hay diferencias genéticas entre individuales que podrían ser predictores útiles del rendimiento deportivo a nivel de élite/profesional<sup>17</sup>. Según el conocimiento actual de estas diferencias, se pueden agrupar los genes candidatos a ser analizados en un test genético, según el fenómeno al que estén asociados: para estudiar variables relacionadas con los deportes de resistencia, se pueden incluir los genes PPARA, PPARD, IL6, ACE, CKM o APOE<sup>11</sup>. Si lo que se quiere observar es la fuerza muscular o los deportes anaerobios, los genes candidatos serían ACTN3, ACE, PPARA o CNTFR<sup>11</sup>.



**Figura 5.** La relación existente y los avances en genes que intervienen en el deporte, nutrición personalizada y el conocimiento del genoma del deportista, trabajan al servicio del rendimiento deportivo.

Otro aspecto muy interesante en el estudio deportivo es la muerte súbita, ya que el riesgo de padecerla es una contraindicación obvia para la competición deportiva. Sin embargo, como se trata de un fenómeno que depende de diversas causas, no se conocen todavía todas y es difícil controlarlo completamente. En algunos casos se produce por la presencia de otras enfermedades que predisponen a sufrirla, como ocurre con la cardiomiopatía hipertrófica, a la que se han relacionado más de 400 genes. Entre ellos están MYH6 y ACTC<sup>29</sup>.

## Conclusión

Los avances en genética permiten, poco a poco, desarrollar un diagnóstico o recomendaciones totalmente personalizados. Estos conocimientos tienen aplicación en el mundo de la salud y el control de enfermedades, y en el mundo del deporte, donde

podrían llegar a ayudar a cada individuo a encontrar su deporte idóneo, además de la estrategia nutricional que sea más útil para su organismo.

## CONCLUSIONES

La meta de la carrera de un deportista de competición es obtener los mejores resultados posibles, siempre comprendidos en un estado de salud. Para lograr ese objetivo, el atleta trata de mejorar su rendimiento deportivo, y cuanto mayor sea éste, más productivos serán los entrenamientos y mejor aprovechará todos los recursos que tenga a su alcance.

El recurso más extendido a la hora de mejorar resultados es el entrenamiento, y a éste le sigue la nutrición. Las necesidades nutricionales de un individuo varían con el período competitivo y con el tipo de deporte que se lleva a cabo. Además, la alimentación del deportista debe ser la suficiente para garantizar que su organismo esté preparado para suministrar toda la energía que exija la práctica deportiva. No solo eso, sino que también debe ser de la calidad necesaria para reducir al mínimo las consecuencias negativas que la intensidad del ejercicio pudiera tener, y procurar una recuperación tras el ejercicio rápida, sana y eficaz.

Puede ocurrir que, dada la altísima demanda de energía que conlleva la competición deportiva, no se puedan cumplir los requerimientos con las comidas diarias, aunque lo más común es que eso ocurra durante la competición. Ése es un momento delicado en el que el deportista está dedicado, en cuerpo y mente, a la ejecución correcta de su actividad. Dado que el organismo está sometido a una situación de estrés, resulta óptimo tratar de proporcionarle los nutrientes necesarios sin que su obtención suponga mucho esfuerzo. De esta forma surgen las ayudas ergogénicas de tipo nutricional, que se caracterizan por buscar una digestión fácil y por abastecer al organismo, aunque sin exceso.

Además de la nutrición, existen otros factores que intervienen en la capacitación de una persona para llegar a ser deportista de élite. Entre ellos, se encuentra la carga genética. Desde hace unos años, cada vez son más los estudios que investigan la relación de ciertos genes con el rendimiento deportivo, e intentan establecer una asociación entre la actividad de un gen y un mejor o peor desempeño deportivo. Yendo más allá, se busca clasificar estos genes según tengan una actividad más propia de deportes de resistencia o aerobios, o de deportes de fuerza o anaerobios, y algunos resultan tener labor en ambas modalidades, como es el caso de ACTN3. Esto depende de que se trate del gen normal o de que esté presente el polimorfismo.

Conforme se ha avanzado en la investigación en genética y en nutrición, se ha observado que existe una relación entre ambas ciencias. Este vínculo está comprendido dentro de la Genómica Nutricional, y además es de doble sentido, de forma que la presencia o ausencia de nutrientes en el organismo puede afectar a la expresión génica (Nutrigenómica), pero el genoma también puede influir en el comportamiento del organismo ante la ingesta de ciertos nutrientes (Nutrigenética).

La Genómica Nutricional es una ciencia prometedora, que se caracteriza por tener numerosas aplicaciones. Se estudia la relación de los genes y la nutrición con la aparición de enfermedades de tipo metabólico, como pueden ser la obesidad o la diabetes. Esta ciencia no tiene que limitarse solo al binomio salud – enfermedad, sino que también puede aplicar sus novedades al rendimiento deportivo. En los últimos años se ha demostrado que entre los genes relacionados con el rendimiento deportivo están presentes genes que participan de forma directa o indirecta en el procesamiento de nutrientes.

Estableciendo una relación entre genes, nutrición y deporte, se vuelve posible desarrollar tests genéticos, de forma que se puede conocer cuál es el deporte para el que uno está más preparado, o qué dieta es la ideal para cada persona. Todo esto supone un avance muy importante, ya sea para la consulta nutricional, o para lograr que los deportistas tengan mejor salud y estado nutricional, atendiendo a la vez a sus características individuales para mejorar su rendimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Gil, A. Tratado de Nutrición. Tomo III, Nutrición Humana en el Estado de Salud. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2010, pp. 345-376
2. Apuntes asignatura “Nutrición y alimentación en el deporte” Profesora Marta Castro López, curso 2013 – 2014
3. Carter JM, Jeukendrup AE, Jones DA: The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:2107-11
4. Painelli VS, Nicastro H, Lancha Jr Antonio H.: Carbohydrate mouth rinse: does it improve endurance exercise performance? *Nutrition Journal* 2010;9:33
5. Heck AL, Barroso CS, Callie ME, Bray MS: Gene-Nutrition Interaction in Human Performance and Exercise Response. *Nutrition* 2004;20:598-602
6. Volek JS, Freidenreich DJ, Saenz C, Kunces LJ, Creighton BC, Bartley JM et al.: Metabolic characteristics of ketoadapted ultra-endurance runners, *Metabolism* 2015
7. Apuntes asignatura “Biología molecular y nutrición humana” Profesora Patricia Meade Huerta, curso 2014 – 2015
8. Sales NMR, Pelegrini PB, Goersch MC: Nutrigenomics: Definitions and Advances of This New Science *J Nutr Metab.* 2014;2014
9. Xacur-García F, Castillo-Quan JI, Hernández-Escalante VM, Laviada-Molina H. Genómica nutricional: una aproximación de la interacción genoma-ambiente. *Rev. méd. Chile* [Internet]. 2008;136:1460-1467. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-98872008001100014&lng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872008001100014&lng=es).
10. Gómez Ayala, AE. Nutrigenómica y nutrigenética: la relación entre la alimentación, la salud y la genómica, *OFFARM.* 2007;26:78-85
11. Bray MS, Hagberg JM, Pérusse L, Rankinen T, Roth SM, Wolfarth B et al: Human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2006-2007 update. *American College of Sports Medicine.* 2008;34-72
12. [Ncbi.nlm.nih.gov/pubmed](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed) [Internet]. Bethesda: National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine [consultado 26 Nov 2015]. Disponible en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>
13. MacArthur DG, Seto JT, Raftery JM, Quinlan KG, Huttley GA, et al.: Loss of ACTN3 gene function alters mouse muscle metabolism and shows evidence of positive selection in humans. *Nat Genet.* 2007;39:1261–1265.
14. Ivarsson N, Westerblad H.  $\alpha$ -Actinin-3: Why Gene Loss Is an Evolutionary Gain. *PLoS Genet.* 2015 Jan 15;11(1):e1004908.

15. Head SI, Chan S, Houweling PJ, Quinlan KGR, Murphy R, et al.: Altered Ca<sup>2+</sup> kinetics associated with  $\alpha$ -actinin-3 deficiency may explain positive selection for ACTN3 null allele in human evolution. *PLoS Genet* 2015;11: e1004862
16. Gómez Gallego, Félix. El deportista de élite: ¿nace o se hace? SEBBM Divulgación. 2013;29
17. Yang N, MacArthur DG, Gulbin JP, Hahn AG, Beggs AH, Eastel S, North K. ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *Am J Hum Genet.* 2003 Sep; 73(3):627-31.
18. Legaz Arrese, A. Manual de entrenamiento deportivo. Badalona: Editorial Paidotribo; 2012, pp. 17-26
19. Friedlander SM, Herrmann AL, Lowry DP, Mephram ER, Lek M, et al.: ACTN3 Allele Frequency in Humans Covaries with Global Latitudinal Gradient. *PLoS ONE.* 2013;8(1): e52282
20. Dengel DR, Brown MD, Ferrell RE, Reynolds THt, Supiano MA. Exercise-induced changes in insulin action are associated with ACE gene polymorphisms in older adults. *Physiology Genomics.* 2002;11:73–80
21. McKenzie JA, Weiss EP, Ghiu IA, et al.: Influence of the interleukin-6 j174 G/C gene polymorphism on exercise training- induced changes in glucose tolerance indexes. *J Appl Physiol.* 2004;97:1338–42
22. Eynon N, Ruiz JR, Oliveira J, Duarte JA, Birk R, Lucia A: Genes and elite athletes: a roadmap for future research. *J Physiol.* 2011;589(13):3063-3070
23. Womack CJ, Saunders MF, Bechtel MK, Bolton DJ, Martin M, Luden ND et al.: The influence of a CYP1A2 polymorphism on the ergogenic effects of caffeine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition.* 2012;9:7
24. González Gallego J, Sánchez Collado P, Mataix Verdú J. Nutrición en el deporte: ayudas ergogénicas y dopaje. España: Editorial Díaz de Santos; 2006.
25. Burke, Louise. Alimentos y suplementos para deportistas. Nutrición en el deporte. Un enfoque práctico. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2007, pp. 41-68.
26. Olivos C, Cuevas A, Álvarez V, Jorquera C: Nutrición para el entrenamiento y la competición. *Rev. Med. Clin. Condes.* 2012; 23(3) 253-261
27. Naziroglu M, Kiliç F, Uğuz AC, et al. Oral vitamin C and E combination modulates blood lipid peroxidation and antioxidant vitamin levels in maximal exercising basketball players. *Cell Biochem Func.* 2010;28:300-305.
28. Pavlidis C, Lanara Z, Balasopoulou A, Nebel JC, Katsila T, Patrinos GP: Meta-Analysis of Genes in Commercially Available Nutrigenomic Tests Denotes Lack of Association with Dietary Intake and Nutrient-Related Pathologies. *OMICS.* 2015;19(9)
29. Sánchez J, Campuzano O, Iglesias A, Brugada R: Genética y deporte. *Apunts med sport.* 2009;162:86-97