

# Genética, Performance Física Humana e Doping Genético: o Senso Comum Versus a Realidade Científica



ARTIGO DE REVISÃO

## Genetics, Human Physical Performance and Gene Doping: The Common Sense Versus the Scientific Reality

Rodrigo Gonçalves Dias

Laboratório de Genética e Cardiologia Molecular; Unidade de Hipertensão e Unidade de Reabilitação Cardiovascular e Fisiologia do Exercício – Instituto do Coração – InCor (HCFMUSP) – São Paulo/SP, Brasil. GENES of HIGH Performance - Polícia Militar do Estado de São Paulo; São Paulo/SP; Brasil. Laboratório de Estudo Cardiovascular – Departamento de Fisiologia e Biofísica/IB; Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) – Campinas/SP, Brasil.

### Endereço para correspondência:

Instituto do Coração – InCor (HC-FMUSP) Cardiologia Translacional/Laboratório de Genética e Cardiologia Molecular Av. Dr. Enéas de Carvalho Aguiar, 44 (5º andar; Bloco II; Sala 2) Cerqueira César – 05403-000 – São Paulo, SP, Brasil. E-mail: diasrg99@yahoo.com.br

### RESUMO

Atletas de elite são reconhecidos como fenômenos esportivos e o potencial para atingir níveis superiores de *performance* no esporte está parcialmente sob o controle de genes. A excelência atlética é essencialmente multifatorial e determinada por complexas interações entre fatores ambientais e genéticos. Existem aproximadamente 10 milhões de variantes genéticas dispersas por todo o genoma humano e uma parcela destas variantes têm demonstrado influenciar a responsividade ao treinamento físico. Os fenótipos de *performance* física humana parecem ser altamente poligênicos e alguns estudos têm comprovado a existência de raras combinações genotípicas em atletas. No entanto, os mecanismos pelos quais genes se interagem para amplificar a *performance* física são desconhecidos. O conhecimento sobre os genes que influenciam a treinabilidade somado ao potencial uso indevido dos avanços da terapia gênica, como a possível introdução de genes em células de atletas, fez surgir o termo *doping* genético, um novo e censurado método de amplificação da *performance* física, além dos limites fisiológicos. Aumentos na hipertrofia muscular esquelética e nos níveis de hematócrito estão sendo conseguidos através da manipulação da expressão de genes específicos, mas a grande parte das impressionáveis alterações foi obtida em experimentação com animais de laboratório. A compreensão dos resultados científicos envolvendo genética, *performance* física humana e *doping* genético é uma difícil tarefa. Com o propósito de evitar a contínua má interpretação e propagação de conceitos errôneos, esta revisão, intencionalmente, vem discutir as evidências científicas produzidas até o momento sobre o tema, permitindo a compreensão do atual “estado da arte”.

**Palavras-chave:** genes, variantes genéticas, *performance* física, atletas de elite, *doping*.

### ABSTRACT

Elite athletes have always been referred to as sports phenomena and their potential to reach higher performance levels in sports, far beyond normal range, is partially under the control of genes. Athletic excellence is essentially multifactorial and it is determined by a complex interaction of environmental and genetic factors. There are almost 10 million genetic variants spread throughout the entire human genome and some of them have been proven to affect physical training responsiveness. The human performance phenotypes seem to be highly polygenic and previous research has found rare genotype combinations in elite athletes. Nevertheless, the mechanisms through which genes interact with each other in order to improve physical performance are unknown. The knowledge on genes that influence trainability added to the potential misuse of advances in gene therapy, such as the possible introduction of genes into athlete cells, gave way to the terminology gene doping, a new and prohibited method of enhancing athletic performance above physiological limits. Increase in skeletal muscle hypertrophy and haematocrit levels has been achieved by the manipulation of the expression of specific genes, but great part of impressive changes in these phenotypes have been obtained using laboratory animals. The understanding on the scientific studies enclosing genetics, human physical performance and gene doping is an intricate task. This review intentionally highlights the scientific evidence that has been produced so far on this popular topic, with the purpose to avoid continuous misinterpretation and spreading of faulty concepts allowing hence the comprehension on the current “state of the art” in this field.

**Keywords:** Genes; genetic variants, physical performance; elite athletes; doping.

### INTRODUÇÃO

Atletas que se destacam no mundo do esporte de alto rendimento são reconhecidos como “fenômenos” pelo senso comum. Esta caracterização parece ser coerente, uma vez que tornar-se um talento extraordinário no esporte é algo raro e alcançável por uma pequena

parcela de todos que o almejam ser. Exemplo disso é o fato de que, medalhistas olímpicos e recordistas mundiais são os *outliers* de um grupo já seletivo e que se destaca dentre os atletas engajados em modalidades esportivas específicas. Embora este raciocínio tenha sua fundamentação em pontos meramente observacionais, a visão do senso comum não deixa de estar correta uma vez que a *performance*

física humana pode ser fundamentada em comprovações científicas. Há quem ousou dizer que atletas são pessoas comuns que nascem e são preparadas para serem atletas, levantando a possibilidade de que a *performance* física e a destreza esportiva são exclusivamente o resultado de horas despendidas em concentração e treinamento físico<sup>(1)</sup>. Estes autores admitem que a estatura e outras características estruturais corporais favorecem o sucesso em determinadas modalidades esportivas, mas reforçam o fato de que a assiduidade ao treinamento físico é um fator importante e que pode sobrepor-se a qualquer contribuição proveniente dos genes. No entanto, é pouco provável que esta teoria corresponda à realidade a partir do momento em que a *performance* física humana é reconhecida como um FENÓTIPO multifatorial, ou seja, controlada pela interação entre diversos fatores ambientais e determinada por fatores genéticos. Em termos práticos, o treinamento físico (um fator ambiental) comprovadamente induz adaptações morfofuncionais nos diversos sistemas fisiológicos, mas o grau da adaptação depende das interações entre múltiplos genes, que por sua vez são modulados por múltiplas variantes genéticas. A identificação dos genes e variantes genéticas com potencial em influenciar variáveis fisiológicas em resposta ao treinamento físico é a base para a compreensão do que vem a ser o potencial genético de um atleta.

Nesta nova era, a da medicina genômica, o mapeamento e sequenciamento do DNA tornou possível rastrear o genoma humano com a intenção de identificar estes genes e as variantes genéticas que o afetam e, conseqüentemente, caracterizar geneticamente os “fenômenos” do esporte de alto rendimento. Toda esta tecnologia laboratorial ainda tornou realidade a manipulação de genes, uma estratégia desenvolvida para fins terapêuticos, mas referida no mundo esportivo como “*doping genético*”. A partir deste contexto, movidos pela ansiedade somada à dificuldade de compreensão do tema, uma parcela da comunidade esportiva vem emitindo comentários e opiniões que não correspondem à realidade das comprovações científicas alcançadas até o momento. Por sua vez, a mídia, movida pela relevância do tema “Genética, *Performance Física Humana e Doping Genético*” e fundamentada em conceitos errôneos, tem propagado uma realidade distorcida. O produto final é um ciclo crescente de informações irreais e que alimentam a imaginação dos que vislumbram a utilização de substâncias e métodos ilícitos *hightech* para induzir aumento de *performance* física, além dos limites fisiológicos.

Mediante a simplificação dos conceitos completos da GENÔMICA FUNCIONAL é possível elaborar um cenário compreensível e real. No entanto, esta simplificação necessariamente deve vir acompanhada de fundamentação científica para que afirmações, como as que seguem, não ocultem a ciência em meio às falsas aparências.

**“O uso de determinados recursos ergogênicos ilícitos (ex. esteroides anabólicos androgênicos, GH, IGF) reverte a genética desfavorável de um indivíduo; atletas têm genes que nós pessoas comuns não temos; mutações genéticas alteram de forma semelhante todas as funções fisiológicas do organismo; olhando para aquele atleta é**

**possível ver que sua genética é favorável; um atleta imbatível nascerá se previamente seus pais forem submetidos ao doping genético; o doping genético não destrói o organismo, como o uso de drogas o faz; o doping genético altera os genes dos atletas.”**

Estas frases exemplificam algumas das informações veiculadas livremente como absolutas verdades, a respeito do cenário do esporte de alto rendimento. Esta revisão tem como objetivo censurar as falsas afirmações no que se refere ao tema Genética, *Performance Física Humana e Doping Genético*, proporcionando o entendimento do atual e real “estado da arte”. Parte das explicações foi simplificada para minimizar as dificuldades de entendimento sobre a genética. Intencionalmente, em cada tópico explorado faz-se referência à forma correta dos conceitos errôneos do senso comum, no sentido de estimular as discussões com fundamento científico.

## GENÉTICA

**Pessoas “comuns” e atletas de elite têm absolutamente os mesmos genes. O que o genoma de atletas pode apresentar de diferente, em comparação ao genoma das pessoas “comuns”, são variantes no código dos genes específicos envolvidos na modulação dos fenótipos de performance física.**

A conclusão do mapeamento e sequenciamento do genoma humano tem seu TODOsmarco em 2004, anunciada pelo *International Human Genome Sequencing Consortium* na edição de outubro do periódico *Nature*<sup>(2)</sup>. O DNA humano contém aproximadamente 3,1 bilhões de pares de bases (A – adenina; G – guanina; C – citosina; T – timina) divididos em 20-25 mil genes. Após transcrita, a sequência de nucleotídeos de cada gene é traduzida em uma sequência polipeptídica, dando origem a uma proteína específica. O genoma humano contém quase 10 milhões de POLIMORFISMOS DE NUCLEOTÍDEO ÚNICO (SNPs – *single nucleotide polymorphisms*). No entanto, nem todos os SNPs são reconhecidos como funcionais, ou seja, nem todos têm potencial em afetar a expressão de um gene ou a função da proteína codificada por um gene mutante. Sendo assim, dentre as quase 10 milhões de variantes genéticas existentes, apenas uma parcela delas poderia influenciar um fenótipo específico<sup>(3)</sup>. Exemplificando, a variante C34T do gene da AMP deaminase (AMPD1; cromossomo 1p13-p21) do tipo *nonsense*, transição do nucleotídeo C – T na posição 34 do exon 2, resulta em um *stop codon* e, conseqüentemente, interrupção prematura da síntese proteica. Indivíduos HOMOZIGOTOS para o gene mutante (genótipo TT) apresentam atividade da enzima AMPD1 inferior a 1% da encontrada nos indivíduos *wild-type* (genótipo CC). Pelo fato de este gene estar envolvido na manutenção das necessidades energéticas da musculatura esquelética durante atividade contrátil, a variante C34T do gene AMPD1 poderia influenciar a *performance* física em modalidades esportivas específicas. A compreensão sobre como variantes genéticas em alguns genes específicos podem influenciar a *performance* física de atletas de elite foi previamente descrita e leitores interessados podem remeter-se à revisão de Dias *et al.*<sup>(4)</sup>. Seguindo o raciocínio de que variantes genéticas podem afetar a responsividade ao treinamento físico, aproximadamente 200 variantes em genes específicos já foram identificadas e mostraram influenciar os fenótipos de capacidade cardiorrespiratória, resistência, força e potência muscular e intolerância ao exercício físico<sup>(5)</sup>.

**Os fenótipos de capacidade cardiorrespiratória, resistência, força e potência muscular e intolerância ao exercício físico são multigênicos, ou seja, controlados por vários genes. As adaptações fisiológicas em resposta ao treinamento físico acontecem como consequência das alterações de expressão gênica. Cada gene com expressão alterada contribui com uma parcela da modulação total que ocorre em um fenótipo.**

**GENÓTIPO E FENÓTIPO** – Genótipo é a constituição genética de um indivíduo, determinada pelo par de genes alelos, um recebido do pai e outro da mãe. O fenótipo é a característica observável ao nível bioquímico, fisiológico ou morfológico, determinado pela interação entre os genes e o meio ambiente.

**VARIANTE GENÉTICA** – Alteração na sequência de nucleotídeos de um alelo. Pode ser referida com polimorfismo genético quando a frequência do genótipo mais raro em uma população é superior a 1%.

**GENÔMICA FUNCIONAL** – Estudo das respostas fisiológicas com base na análise de genes.

**SNP** – Troca de um único nucleotídeo na sequência de bases de um gene.

**HOMOZIGOTO e HETEROZIGOTO** – Homozigose refere-se a dois alelos de um mesmo gene com sequências de nucleotídeos idênticas. Heterozigose refere-se a dois alelos de um mesmo gene com sequências de nucleotídeos diferentes.

A grande maioria destas 200 variantes identificadas é proveniente de estudos de associação em genética que testaram o potencial que uma variante genética em um gene isolado tem de afetar um fenótipo multigênico. Como resultado, foram identificados genes que conferem desde pequena a moderada participação na regulação daqueles fenótipos. Em termos práticos, isto equivale dizer que o somatório da influência de cada variante genética do conjunto de genes envolvidos na modulação da capacidade cardiorrespiratória é quem determinará o grau da adaptação ao treinamento físico. Vale ressaltar que, eventualmente, uma única variante genética em um gene específico pode apresentar grande participação na regulação de um fenótipo multigênico.

**Um atleta olímpico e recordista em determinada modalidade pode apresentar variantes genéticas que amplificam ou inibem determinadas funções fisiológicas. Esta bagagem genética só pode ser conhecida mediante a genotipagem do atleta. As discussões relacionadas à influência da genética na determinação do biotipo tornam-se relevante no contexto da detecção de talentos esportivos com base na análise genética, mas pouco contribuem para o entendimento de como a genética influencia a performance física humana.**

Fatores genéticos e ambientais contribuem para a modulação das dimensões e da composição corporal<sup>(6)</sup>. Estudos de agregação familiar e herdabilidade demonstram que as características morfológicas como estatura e comprimento dos ossos e membros estão em grande parte sob o controle de genes. No entanto, o cenário completo das variantes genéticas e as interações gene-gene e genes-ambiente nas diferentes fases do desenvolvimento são pouco conhecidos. Considerando que modalidades esportivas distintas exigem biotipos específicos, um indivíduo pode apresentar as variantes genéticas necessárias para a determinação das exatas dimensões corporais, mas não necessariamente as variantes genéticas que afetam a responsividade ao treinamento físico. Dentre os genes e suas respectivas variantes genéticas identificadas até o momento, alguns parecem favorecer o desenvolvimento de alta performance física em modalidades que exigem força/potência e outros em modalidades que exigem resistência. Como estes fenótipos são multigênicos, quem sabe a existência de um atleta geneticamente perfeito estaria na dependência do número de variantes genéticas favoráveis e desfavoráveis, presentes em seu genoma. A frequência de variantes genéticas em diferentes genes envolvidos na modulação da performance física apresenta grande variação. Exemplo disso são os genes da proteína desacopladora 2 (UCP2 – *uncoupling protein 2*; cromossomo 11q13) e do receptor- $\alpha$ 2 adrenérgico (ADRA2A – *alpha-2A-adrenergic receptor*; cromossomo 10q24-q26) em que a frequência dos genótipos que favorecem a performance física pode chegar a 17% e 62%, respectivamente<sup>(7,8)</sup>. Neste caso, um determinado indivíduo tem 62% de chance de apresentar o genótipo 6.7/6.7 do gene ADRA2A. No entanto, a probabilidade de este mesmo indivíduo apresentar o genótipo 6.7/6.7 do gene ADRA2A mais o genótipo V/V para o gene UCP2 é de 10,5%. Cada genótipo de preferência acrescentado resultará em queda multiplicativa do cálculo de probabilidade combinada, supondo a independência dos alelos. Atualmente, variantes genéticas em 23 genes mostraram influenciar o fenótipo de resistência. Williams e Folland<sup>(9)</sup>, utilizando-se do mesmo raciocínio acima, demonstraram que a probabilidade de um indivíduo vir a apresentar os genótipos de preferência para os 23 genes, ou seja, ser o portador do “ótimo perfil poligênico para resistência” é extremamente pequena, de  $8,2 \times 10^{-14}\%$ . Isso significa que a chance de a população mundial apresentar os 23

pares de alelos de preferência é de uma em 1.212 trilhões. Ou seja, a população mundial necessitaria ser aproximadamente 200 mil vezes maior para que este indivíduo geneticamente favorecido aparecesse. No entanto, nas reais circunstâncias seria improvável que o “ótimo perfil poligênico para resistência” existisse em um único indivíduo no mundo. Gonzalez-Freire *et al.*<sup>(10)</sup> genotiparam sete atletas de *long race* da modalidade *cross-country* para sete variantes genéticas (genes ACTN3, ACE, PPARGC1A, AMPD1, CK-MM, GDF-8 e HFE) associadas à performance física em provas de resistência. Curiosamente, apenas o campeão mundial de 2007, reconhecido por sua alta performance durante o ano 2008 e em edições anteriores, apresentou os sete genótipos de preferência, sugerindo que parte do seu sucesso pode ser atribuída à rara combinação genotípica.

Estudos caso-controle, que demonstram maior frequência de variantes em genes associados à performance física em atletas, quando comparados a indivíduos da população geral, somado aos achados sobre a rara combinação genotípica em atletas, sustentam a afirmação de que a genética é o determinante indispensável para a excelência no esporte de alto rendimento. Interessantemente, um indivíduo portador do maior número de genótipos associados à performance física não necessariamente estaria representando sua nação no esporte de alto rendimento. A bagagem genética somada às oportunidades e ao contexto social e econômico são quem evidenciam um atleta. Talvez o maior talento esportivo existente no mundo nunca tenha sido estimulado a explorar o seu potencial atlético.

**Uma positiva associação entre uma variante em um gene e uma resposta fisiológica indica que tal variante tem participação na modulação de um determinado fenótipo de performance física. No entanto, esta positiva associação não diz o quanto aquele gene participa da modulação do fenótipo. Além disso, um mesmo gene pode ser expresso e modular dois ou mais fenótipos distintos e ter diferentes percentuais de participação na modulação dos mesmos.**

Genes podem apresentar efeito PLEIOTRÓPICO. Exemplo disso é o gene do angiotensinogênio (AGT; cromossomo 1q42-q43) envolvido tanto no remodelamento cardíaco quanto na reatividade vascular. Basicamente, nos tecidos locais e na circulação sanguínea, o AGT é clivado em angiotensina I pela renina. Por sua vez, angiotensina I é convertida em angiotensina II pela enzima conversora de angiotensina (ACE). Angiotensina II ativa receptores específicos localizados na superfície das células cardíacas e do músculo liso vascular, induzindo hipertrofia cardíaca e vasoconstrição, respectivamente. Um polimorfismo de nucleotídeo único (transição T C), resultante na substituição do aminoácido metionina (M) por treonina (T) no códon 235 (M235T), vem sendo associado a níveis aumentados de AGT<sup>(11)</sup>. Recentemente, Alves *et al.*<sup>(12)</sup> verificaram que indivíduos saudáveis portadores do genótipo TT apresentam maior hipertrofia de ventrículo esquerdo em resposta ao treinamento físico de resistência, quando comparado aos genótipos MM/MT. Utilizando-se desta mesma população, Dias *et al.*<sup>(13)</sup> identificaram não haver influência desta variante genética no fenótipo de reatividade vascular. A vasodilatação muscular induzida pelo exercício físico é semelhante entre os genótipos MM, MT e TT. Em adição, a melhora na resposta vasodilatadora induzida pelo treinamento físico não foi diferente entre os genótipos. Estes resultados sustentam a afirmação de que uma mesma variante em um único gene tem participação distinta na modulação de dois fenótipos.

Conforme mencionado anteriormente, genes envolvidos na modulação de fenótipos multigênicos, como os de performance física humana, apresentam de pequena a moderada participação na regulação dos mesmos, mas, eventualmente, uma única variante genética em um gene específico pode apresentar grande participação na regulação destes fenótipos. Durante atividade muscular contrátil, parte do aumento

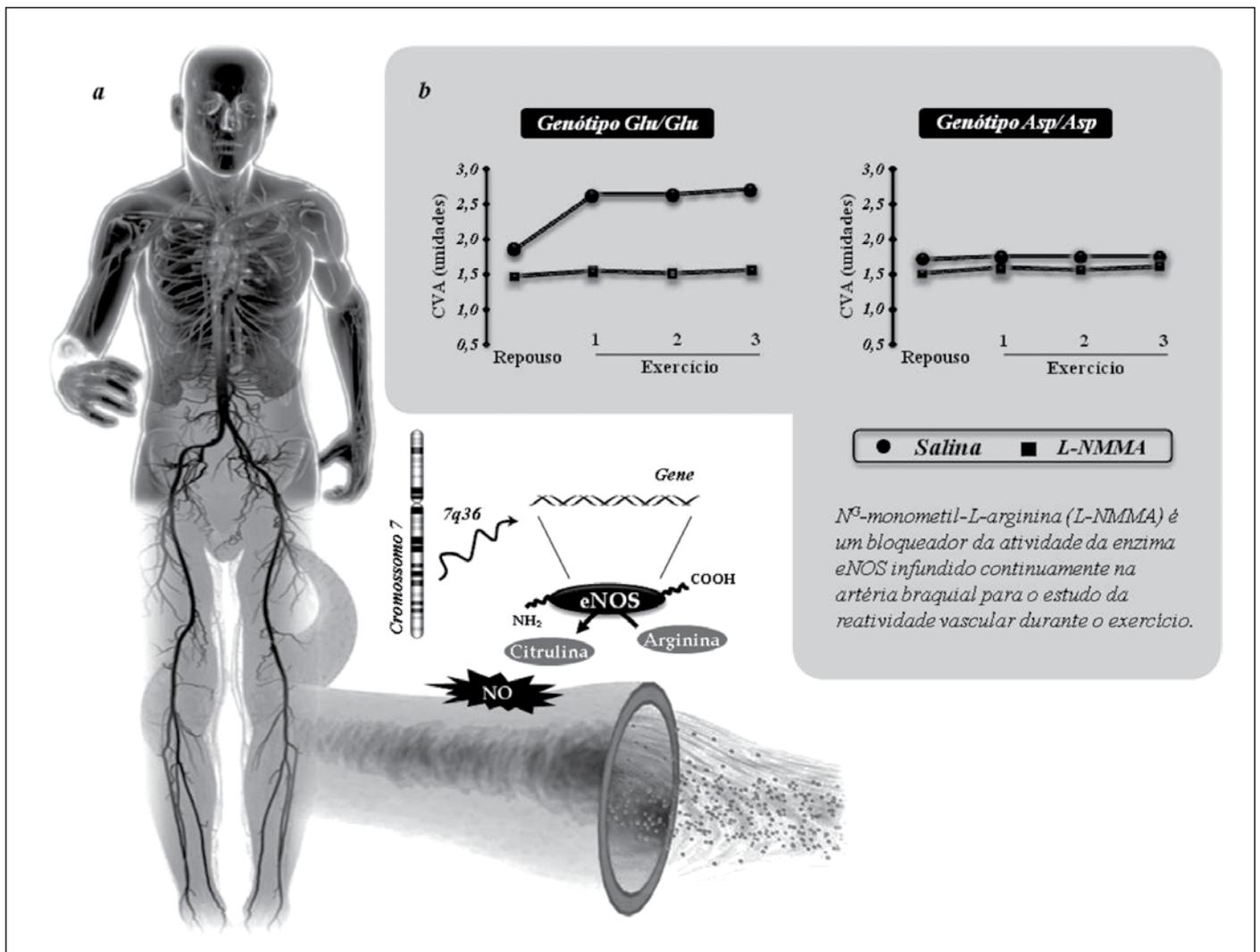
PLEIOTROPISMO – termo designado à caracterização de um único gene envolvido na modulação de mais de um fenótipo.

na demanda energética é sustentada por ajustes cardiovasculares. O aumento do débito cardíaco somado à vasodilatação muscular garante maior redirecionamento de fluxo sanguíneo para a musculatura esquelética. A reatividade vascular é um fenótipo multigênico modulado por forças constritoras e dilatadoras. Dentre as dilatadoras, o óxido nítrico (NO) sintetizado nos vasos pela isoforma endotelial da enzima óxido nítrico sintase (eNOS) é reconhecido como uma das mais importantes (figura 1a). A variante G894T do gene da eNOS (cromossomo 7q36) resulta na transição do aminoácido glutamato (Glu) por aspartato (Asp) na posição 298 (Glu298Asp) da sequência polipeptídica da enzima. Dias *et al.* (2009)<sup>(14)</sup> verificaram que indivíduos portadores do genótipo TT (Asp/Asp) apresentam prejudicada vasodilatação muscular. Análises subsequentes *in vivo* comprovaram o fato inédito de que o NO é responsável por aproximadamente 90% da vasodilatação muscular induzida pelo exercício (figura 1b). Um exemplo de um único gene que, sinergicamente a outros genes, apresenta grande participação na regulação do fenótipo de vasodilatação. Este contexto tornar-se-á importante nas discussões subsequentes relacionadas aos potenciais genes candidatos ao *doping* genético.

## Características inatas e adquiridas

Um “fenômeno” esportivo é o resultado da adequada exploração do potencial genético, através de estímulos externos como treinamento físico e dieta, somado à adequada preparação mental.

Os debates relacionados às relativas contribuições das qualidades inatas *versus* experiências pessoais (*Nature versus Nurture*) para a determinação da máxima *performance* física, pouco acrescentam para o entendimento das particularidades dos atletas de elite. A errônea tentativa de separação entre gene e ambiente somada às controversas entre relatos pessoais e argumentos científicos amplifica a problemática. A edificação de “fenômenos” esportivos depende da interação entre genes e ambiente e, em adição, dos fatores psicológicos. A compreensão exata do quanto cada fator contribui para a expressão do produto final, ou seja, de um “fenômeno” esportivo, é desconhecida. Interessantemente, variantes genéticas também são encontradas em genes com potencial em influenciar as conexões neurais, podendo afetar características como humor, percepção de esforço, inteligência emocional, positivismo e agressividade. Lippi *et al.*<sup>(15)</sup> atentam para o fato de que



**Figura 1.** Óxido nítrico (NO) e sua participação na regulação do fluxo sanguíneo muscular durante o exercício físico. a) O gene da eNOS está localizado no cromossomo 7q36 e após transcrito é traduzido na enzima eNOS. Basicamente, a eNOS, localizada nas células do endotélio vascular, é ativada principalmente por estresse de cisalhamento (shear-stress), convertendo L-arginina em L-citrulina e NO. Durante o exercício físico, a eNOS é mais ativada e o aumento na síntese do NO parece ser o principal responsável pela vasodilatação muscular. b) Reatividade vascular medida no antebraço durante exercício isométrico de handgrip. Os gráficos representam o fluxo sanguíneo em repouso e a vasodilatação muscular em um único indivíduo homocigoto wild-type (genótipo Glu/Glu) e em um único indivíduo homocigoto para o gene mutante (genótipo Asp/Asp). Observe que a resposta natural (salina) de vasodilatação muscular verificada para o indivíduo Glu/Glu mostra-se prejudicada no indivíduo Asp/Asp. Durante a infusão intra-arterial de L-NMMA, a vasodilatação muscular é virtualmente abolida (~90%) no indivíduo Glu/Glu, permanecendo praticamente inalterada no indivíduo Asp/Asp. Estes resultados comprovam que a enzima traduzida a partir do alelo T não aumenta a biossíntese do NO em resposta ao estímulo do exercício físico e que NO, por si só, apresenta grande participação na modulação do fenótipo de reatividade vascular. CVA – condutância vascular no antebraço.

o sucesso no esporte de alto rendimento depende de atributos como habilidade no controle das emoções, coesão, maturidade, capacidade de antecipação e tomada de decisão. Conjuntamente com a motivação e a persistência, estes atributos estariam ligados à *performance* mental. A influência de variantes em genes associados a fenótipos psicológicos vem sendo investigada. Detalhes relacionados a este tópico são encontrados em Bryan *et al.*<sup>(16)</sup> e Maliuchenko *et al.*<sup>(17)</sup>.

**O máximo rendimento de atletas de elite é determinado pela máxima exploração do seu potencial genético, através de estímulos externos, somado à máxima expressão da performance mental. No entanto, o quanto cada fator irá contribuir para a edificação de um “fenômeno” esportivo está em parte na dependência da modalidade esportiva.**

Modalidades esportivas distintas exigem de forma diferente dos componentes genético, ambiental e psicológico. Talvez uma modalidade cíclica (ex. 100m atletismo) possa depender mais da máxima *performance* física e menos da coesão e tomada de decisão, quando comparada a uma modalidade acíclica (ex. futebol). Nesta última, uma maior *performance* mental poderia resultar em sucesso até mesmo na ausência de uma *performance* física excepcional. Independente deste detalhe, no mundo do esporte de alto rendimento predomina o raciocínio de que o sucesso está na dependência da transposição dos limites fisiológicos, mesmo que para isso seja necessário o uso de substâncias e métodos não convencionais para a amplificação da *performance* física humana.

## DOPING

Esforços foram feitos visando a criação de uma organização que pudesse promover, coordenar e monitorar as iniciativas contra o *doping* no esporte. O Código Mundial Anti-Doping (*World Anti-Doping Code*) foi elaborado e implementado pela Agência Mundial Anti-Doping (*WADA – World Anti-Doping Agency*) no sentido de harmonizar as questões políticas e diretrizes do anti-*doping* para todas as modalidades esportivas e em todos os países. Em adição, a WADA responsabiliza-se em emitir, a cada ano, uma lista atualizada dos compostos e procedimentos que caracterizam o *doping*. O *doping* é definido como o uso ilícito de substâncias e métodos visando a amplificação artificial da *performance* física e/ou mental. A intenção do controle anti-*doping* é a de zelar pela saúde dos atletas, além de promover igualdade na corrida pelo único propósito de vencer. Recentemente, o termo *doping* genético foi introduzido na lista da WADA (*Prohibited List – International Standard*) como sendo um novo método passível de utilização para a modulação da *performance* física e que, portanto, estaria proibido. De forma geral, o *doping* genético usufrui das avançadas estratégias em tecnologia de transferência de genes, desenvolvida para prevenir e tratar doenças através da manipulação da expressão de genes específicos. A WADA define o *doping* genético como sendo o uso não terapêutico de células, genes, elementos genéticos ou a modulação da expressão gênica com potencial em aumentar a *performance* atlética. As particularidades relacionadas à utilização das técnicas de terapia gênica para fins de *doping*

---

**CÉLULAS GERMINATIVAS E CÉLULAS SOMÁTICAS** – Células germinativas ou reprodutivas possuem ( $n$  = haploides; 23 cromossomos) e são representadas por oócito e espermatozoides, em humanos e animais. Células somáticas ( $2n$  = diploides;  $2 \times 23$  cromossomos) são todas as células, excluindo as destinadas à formação de gametas ( $n$ ).

**TRANSFECCÃO** – Transferência de um gene exógeno para células somáticas.

**PRÉ-CLÍNICO E CLÍNICO** – As investigações em terapia gênica se dividem em: pré-clínico, fase na qual os testes são realizados utilizando-se de animais de laboratório; e clínico, fase na qual os testes são conduzidos em humanos.

**VETOR DE TRANSDUÇÃO** – O vetor que conduzirá o gene exógeno ao tecido alvo é, normalmente, um vírus. A utilização de vírus para a transdução é um dos métodos utilizados para a transferência de genes.

**PÓS-MITÓTICO** – Células somáticas não mais em divisão celular.

serão revisadas no sentido de explicitar o real cenário do mundo do esporte de alto rendimento em um momento em que a possibilidade de criação de um atleta geneticamente modificado já é realidade.

## Terapia gênica

A terapia gênica é caracterizada pela introdução de um material genético em células no sentido de graduar a funcionalidade de um gene ou substituir um gene não funcional. Esta estratégia foi desenvolvida e vem sendo aperfeiçoada com o propósito de prevenir, tratar ou aliviar os sintomas de doenças hereditárias ou desordens adquiridas. Basicamente, conhecer a via de sinalização na qual um gene está envolvido, identificar uma possível mutação neste gene e comprovar a disfunção causada pelo gene mutante são os passos iniciais que justificam a utilização da técnica. A terapia gênica pode ser realizada em linhagens de CÉLULAS GERMINATIVAS OU SOMÁTICAS. A introdução (*knock in*) ou deleção (*knock out*) de um gene exógeno em células germinativas resultará na propagação desta modificação para as novas células originárias. Já modificações através da introdução de um gene exógeno em células somáticas de um órgão ficariam restritas às células TRANSFECCIONADAS. No primeiro caso, gerações subsequentes herdariam as alterações genéticas, enquanto que, no caso da transfecção, estas alterações ficariam restritas ao indivíduo transfectado. Por motivos técnicos e éticos, a aplicação da terapia gênica em linhagens de células germinativas de seres humanos não é permitida. Por outro lado, a terapia gênica em células somáticas representa uma tecnologia promissora para a terapêutica, mas ainda com poucos resultados positivos em ESTUDOS CLÍNICOS. Algumas deficiências relacionadas ao método ainda não foram solucionadas, o que pode resultar em risco de morte ou complicações oncogênicas, como em casos já relatados na literatura<sup>(18,19)</sup>. Embora as discussões relacionadas à criação de atletas perfeitos por manipulação do material genético de células germinativas já circundam o mundo do esporte de alto rendimento, o *doping* genético representa as possibilidades de manipulação de genes em linhagens de células somáticas. Em adição, dentre os possíveis genes candidatos ao *doping* nem todos seriam modulados utilizando-se da forma clássica da terapia gênica, que consiste na introdução de um gene exógeno em células específicas no sentido de obter adequada expressão do mesmo. Exemplo desta exceção é a miostatina (*GDF-8, growth differentiation factor 8*; cromossomo 2q32.2) que pode beneficiar-se da forma não clássica, na qual, teoricamente, a inibição do gene *GDF-8* por meio do silenciamento da expressão proteica deve ser conduzida para produzir o efeito hipertrófico desejado na musculatura esquelética.

**A tecnologia para a produção de proteínas por meio da manipulação de genes já é realidade. O fato do potencial efeito terapêutico destas moléculas estar ainda sendo testado em estudos pré-clínicos e clínicos, não exclui a possibilidade de que atletas já estejam fazendo uso das mesmas com o intuito de amplificar a performance física.**

Laboratórios de biologia molecular já utilizam a terapia gênica para experimentação animal e em estudos clínicos. A minimização dos riscos relacionados ao método requer ambiente adequado com tecnologia apropriada para a preparação dos VETORES DE TRANSDUÇÃO e controle de segurança e toxicidade por meio de testes laboratoriais. A permissão para a utilização da terapia gênica em humanos requer extremo controle e aprovação dos órgãos regulamentadores. Esta rigorosidade visa reduzir os riscos de morte e desenvolvimento de doenças associadas ao vetor viral e ao gene exógeno, além de evitar possíveis replicações e recombinações de vírus competentes<sup>(20)</sup>. Mil quinhentos e trinta e sete investigações clínicas com terapia gênica para as mais variadas desordens estão sendo conduzidas em todo o mundo<sup>(21)</sup>. A falta de total eficácia do método, em consequência do somatório de pequenas deficiências como vida curta das células transfectadas, toxicidade e

ativação da resposta imune e inflamatória ao vetor viral, explicam em parte o fato da FDA (*Food and Drug Administration*) não ter aprovado para comercialização, até este momento, nenhum produto proveniente da manipulação de genes. Embora o propósito terapêutico das técnicas de terapia gênica pareça agradar aqueles empenhados com os avanços nos processos de regeneração de tecidos lesados, a principal aplicação para o esporte de alto rendimento está mesmo sustentada no *doping* genético. A diferença entre o uso da manipulação de genes visando terapêutica ou *doping* parece estar no fato de que o segundo, por natureza, não requer permissão, e a segurança não é uma real preocupação. Desenvolvido para investigações terapêuticas, o Repoxygen é uma vetor carregado com o gene da eritropoietina (EPO) e controlado por um elemento responsivo à hipóxia (HRE – *hipoxia-responsive element*). Rumores indicam que o Repoxygen já está em circulação no “mercado negro” e sendo utilizado para fins de amplificação artificial da *performance* física humana<sup>(22)</sup>. Estudos de Lasne *et al.*<sup>(23)</sup> indicam a possibilidade de detecção do *doping* com o gene da EPO. No entanto, até o momento, nenhum teste anti-*doping* foi implementado pela WADA, o que resulta na falta de evidências caso este *doping* genético já esteja realmente sendo utilizado.

### Sistemas fisiológicos e genes candidatos ao *doping*

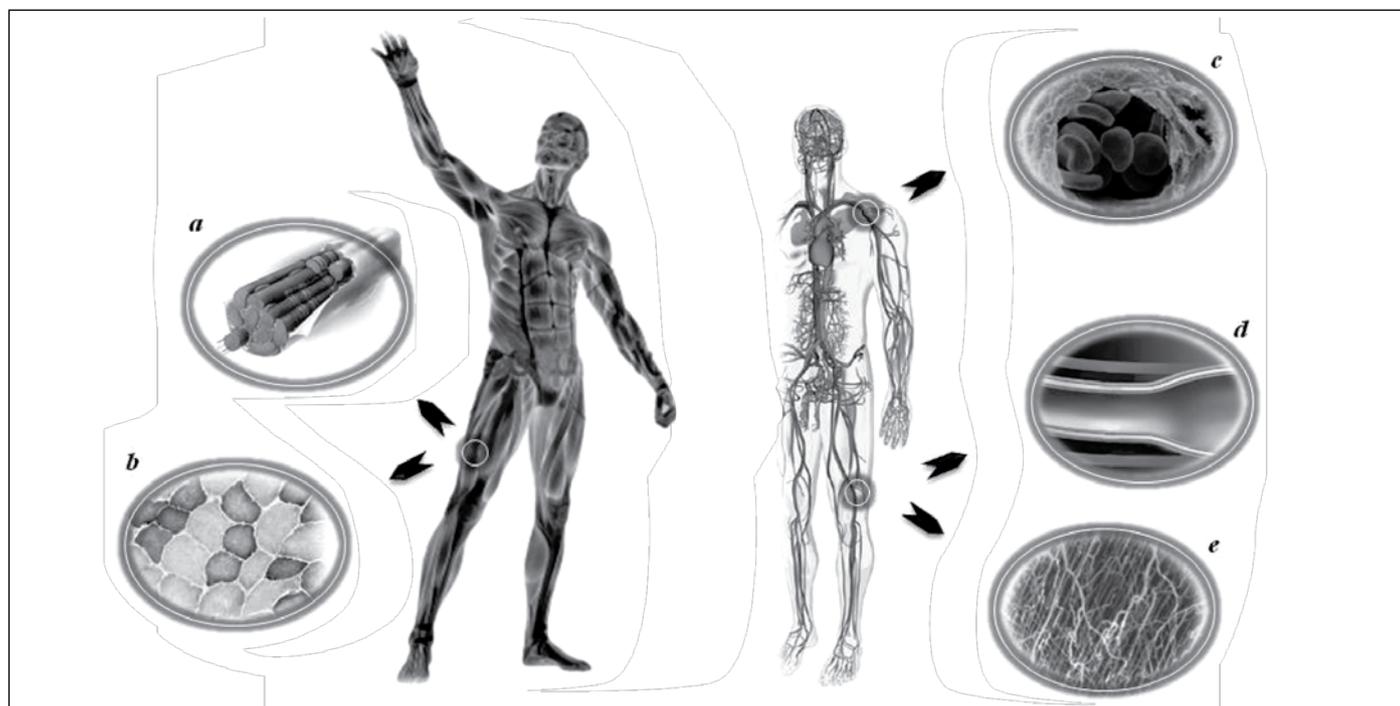
A musculatura esquelética parece ser o principal alvo para a terapia gênica e, conseqüentemente, o *doping* genético. Além do estado pós-mitótico das células, o que garante maior período de expressão do gene exógeno<sup>(24)</sup>, o tecido muscular é de fácil acessibilidade e bastante

vascularizado<sup>(20)</sup>. Um músculo esquelético transfectado com determinado gene pode resultar em efeito direto ou indireto sobre a *performance* física humana. Isso equivale dizer que, se o gene de interesse resultar em hipertrofia ou modulação da tipagem de fibras, o efeito é direto. Por outro lado, o músculo esquelético pode ser transfectado com o gene da EPO, exercendo efeito indireto sobre a *performance* física. Neste caso, o maquinário das células musculares é apenas utilizado para transcrição do gene e tradução da proteína EPO, um hormônio com a função endócrina principal de induzir eritropoiese na medula óssea.

De forma geral, o *doping* genético permitiria ao atleta arquitetar os sistemas fisiológicos utilizando-se dos métodos direto e indireto para a modulação dos fenótipos musculoesquelético, cardiovascular, respiratório e sanguíneo.

**A especificidade da modalidade esportiva na qual o atleta está inserido direciona o interesse pela amplificação da força e/ou potência ou resistência. Posteriormente, o gene com potencial em desencadear tal resposta seria determinado.**

Conforme mencionado anteriormente, aproximadamente 200 variantes em genes específicos foram identificadas até o momento e mostraram influenciar a *performance* física humana e a boa forma relacionada à saúde<sup>(5)</sup>. Esses genes são indicativos dos quais poderiam ser transfectados ou bloqueados no genoma humano, visando a amplificação da *performance* física (figura 2). Como a *performance* física é controlada por um conjunto de genes, aqueles com maior percentual de participação na modulação de um determinado fenótipo seriam os alvos candidatos ao *doping*. Basicamente, a amplificação das capacida-



**Figura 2.** Sistemas fisiológicos modulados por variantes genéticas que podem afetar a expressão de um gene específico ou a função da proteína codificada pelo gene mutante, influenciando os fenótipos de *performance* física humana. O músculo esquelético é o principal alvo ao *doping* genético, podendo exercer efeito direto ou indireto sobre a amplificação da *performance* física. a) Os fenótipos de força e potência muscular são parcialmente modulados por hipertrofia muscular esquelética. Alguns dos genes envolvidos com o aumento da síntese proteica muscular são: ACE, IGF1A, GDF8, FST e GH1. Dentre eles, os principais candidatos ao *doping* genético são os genes IGF1A, GDF8 e FST. b) Os fenótipos de resistência e também os de força e potência muscular são parcialmente modulados pela tipagem de fibras musculares esqueléticas. Alguns dos genes envolvidos com a determinação dos percentuais dos diferentes tipos de fibras são: ACE, PPAR- $\beta/\delta$ , PPARGC1A e PPARGC1B. Dentre eles, os principais candidatos ao *doping* genético são os genes PPAR- $\beta/\delta$ , PPARGC1A e PPARGC1B. c) O fenótipo de resistência é parcialmente modulado pelo transporte do oxigênio para o músculo esquelético. Um dos genes envolvidos com o aumento das hemácias é o gene da EPO, sendo este o principal candidato ao *doping* genético. d, e) O fenótipo de resistência é parcialmente modulado pelo transporte do oxigênio e macronutrientes para o músculo esquelético. Alguns dos genes envolvidos com o aumento da perfusão tecidual por meio da vasodilatação ou angiogênese muscular são: eNOS, VEGF, FGF, HGF e HIF-1 $\alpha$ . Dentre eles, os principais candidatos ao *doping* genético são os genes VEGF, FGF, HGF e HIF-1 $\alpha$ . IGF1A – fator de crescimento semelhante à insulina 1; GDF8 – miostatina; FST – folistatina; GH1 – hormônio do crescimento 1; ACE – enzima conversora de angiotensina; PPAR- $\beta/\delta$  – receptor ativado por proliferador de peroxissomo beta/delta; PPARGC1A – coativadores transcricionais PGC-1 $\alpha$ ; PPARGC1B – coativadores transcricionais PGC-1 $\beta$ ; EPO – eritropoietina; eNOS – óxido nítrico sintase endotelial; VEGF – fator de crescimento endotelial vascular; FGF – fator de crescimento de fibroblasto; HGF – fator de crescimento de hepatócito; HIF-1 $\alpha$  – fator induzido por hipóxia 1 $\alpha$ .

des físicas força/potência ou resistência, além dos limites fisiológicos, pode ser alcançada com a modulação dos genes: eritropoietina (EPO; cromossomo 7q22), enzima conversora de angiotensina (ACE; cromossomo 17q23.3), receptor ativado por proliferador de peroxissomo beta/delta (PPAR- $\beta/\delta$ ; cromossomo 6p21.2-21.1), coativadores transcripcionais PGC-1 $\alpha$  (PPARGC1A, cromossomo 4p15.1) e -1 $\beta$  (PPARGC1B, cromossomo 5q33.1),  $\alpha$ -actinina 3 (ACTN3; cromossomo 11q13.1), fator de crescimento endotelial vascular (VEGF, cromossomo 6p12), fator de crescimento de fibroblasto (FGF, cromossomo 11q13.3), fator de crescimento de hepatócito (HGF; cromossomo 7q21.1), fator induzido por hipóxia 1 $\alpha$  (HIF-1 $\alpha$ ; cromossomo 14q21-q24), fator de crescimento semelhante à insulina 1 (IGF1A; cromossomo 12q22-q23), interleucina 3 (IL3; cromossomo 5q31.1), miostatina (GDF8; cromossomo 2q32.2), folistatina (FST; cromossomo 5q11.2) hormônio do crescimento 1 (GH1; cromossomo 17q24.2) e fosfoenolpiruvato carboxiquinase (PEPCK-C; cromossomo 20q13.31). Genes com potencial em reduzir dor e processos inflamatórios causados por lesão e repetidos traumas também são alvos candidatos ao *doping*<sup>(20)</sup>.

### Animais versus atletas geneticamente modificados

Conforme mencionado anteriormente, as técnicas de terapia gênica ainda se deparam com problemas que inviabilizam sua liberação. A maioria dos resultados terapêuticos promissores com potencial em resultar em amplificação artificial da *performance* física humana são provenientes de estudos pré-clínicos. Em adição, os resultados expressivos são, em grande parte, provenientes de estudos com modelos de animais *TRANSGÊNICOS* para doenças humanas. Não se pode esperar que modificações em células germinativas produzam resultados equivalentes aos verificados quando as modificações são realizadas em células somáticas. É improvável que a transfecção de um gene *in vivo* atinja todas as células somáticas de um tecido alvo. A transfecção do gene IGF por vetor viral em músculo esquelético de rato<sup>(25)</sup> pode não desencadear o mesmo grau de hipertrofia quando comparado a um animal *transgênico* para o gene IGF<sup>(26)</sup>. Além disso, na transfecção por vetor viral, a resposta hipertrofica ocorreria apenas no local da aplicação e nas células transfectadas. Estes resultados com animais sugerem o uso do gene IGF como uma possível estratégia terapêutica em doenças relacionadas às disfunções musculares. Se os possíveis benefícios para pacientes com doenças musculares seriam reproduzíveis em indivíduos saudáveis e atletas, esta questão é desconhecida. Nenhum estudo clínico com terapia gênica com o gene IGF está sendo realizado neste momento<sup>(21)</sup>. No entanto, o potencial do gene IGF em causar hipertrofia pode resultar em ganho extra de força/potência para atletas.

**A introdução em um atleta de um seguimento de DNA contendo gene que possa, quem sabe, duplicar a produção de uma proteína de interesse ou material genético que possa silenciar a produção de outra proteína, caracteriza o doping genético. Além dos riscos intrínsecos do procedimento de terapia gênica para fins de doping, não existe comprovação de que este seja eficaz em produzir o efeito fisiológico desejado.**

A EPO, excretada principalmente pelo fígado, estimula a eritropoiese sustentando a manutenção dos valores fisiológicos de hemoglobina e hematócrito. A transfecção do gene da EPO para a musculatura esquelética de macacos aumentou em 75% o hematócrito<sup>(27)</sup>. Embora o estudo tenha comprovado a eficiência da transfecção do gene da EPO em animais de médio porte, os autores atentam para o fato de que estes resultados apenas facilitam o início das investigações em estudos com humanos. Uma vez que a aquisição da máxima *perfor-*

*mance* física é em parte dependente do fornecimento de oxigênio para a musculatura esquelética, por meio da capacidade de transporte no sangue, hematócrito e hemoglobina elevados poderiam amplificar o desempenho principalmente em provas de resistência. No entanto, esta elevação, somada à desidratação associada ao exercício físico, aumenta a viscosidade do sangue. Além de causar sobrecarga de trabalho cardiovascular, esta viscosidade aumentada pode resultar em bloqueio da microcirculação seguido de morte.

Receptores ativados por proliferador de peroxissomo (PPAR) são receptores nucleares envolvidos no controle da plasticidade da musculatura esquelética. A isoforma PPAR- $\beta/\delta$  está envolvida com a modulação da tipagem de fibras musculares e com o estímulo da biogênese mitocondrial. Em adição, o PPAR  $\beta/\delta$  modula a expressão de genes envolvidos na síntese de enzimas reguladoras da captação e oxidação de ácidos graxos e de genes envolvidos na síntese das isoformas proteicas sarcoméricas, específicas das fibras de lenta contração. Animais *transgênicos* para o gene PPAR- $\delta$  apresentam amplificação da capacidade de resistência, com aumento de 67% e 92% no tempo de exercício e distância percorrida, respectivamente<sup>(28)</sup>. Lunde *et al.*<sup>(29)</sup> confirmaram o fato de que a tipagem de fibras musculares é modulada no sentido IIb IIa I, até mesmo com a transfecção do gene PPAR- $\delta$  em células somáticas. Estes resultados, provenientes de modelos animais, demonstram que fadiga e resistência podem ser moduladas por manipulação genética em fibras musculares adultas e em estado pós-mitótico, sugerindo que o uso do gene PPAR por atletas possa amplificar a *performance* física em provas de resistência, por aumentar a proporção de fibras musculares do tipo I.

O fator 8 de crescimento e diferenciação (miostatina), diferentemente do IGF e GH, limita o crescimento da musculatura esquelética e parece exercer duas funções distintas: 1) controlar o número de miofibras do músculo em desenvolvimento na fase pré-natal; e 2) regular o processo hipertrofico em células pós-mitóticas<sup>(30)</sup>. Animais *knockout* para o gene GDF-8, apresentam volume de massa muscular aproximadamente duas vezes maior, em comparação aos animais controle<sup>(31)</sup>. Este aumento parece resultar da combinação entre hipertrofia e hiperplasia das células musculares. Em um outro estudo, animais *knockout* para o gene GDF-8 e *knockin* para o gene da folistatina apresentaram volume de massa muscular aproximadamente quatro vezes maior, em comparação aos animais controle<sup>(32)</sup>. A folistatina é um antagonista da miostatina e neste estudo comprovou modular o volume de massa muscular também por vias que não a da inibição da miostatina. Conforme mencionado anteriormente, uma forma não clássica de terapia gênica para o GDF-8 seria com o uso do RNA de interferência (RNAi), um mecanismo que inibe a expressão do gene no estágio em que ocorreria a tradução do RNAm na sequência polipeptídica. Até o momento, resultados semelhantes aos verificados em modelos animais não foram reproduzidos em investigações com humanos. No entanto, os estudos apresentados sugerem que a inibição da miostatina e/ou transfecção com o gene da folistatina possa resultar em aumento de *performance* física para atletas engajados em modalidades que exigem força/potência muscular.

### As entrelinhas da genética, *performance* física humana e doping genético

A complexidade dos mecanismos celulares e das interações moleculares não permite que o raciocínio sobre a genética seja "linear". Imaginemos que a natureza contrariasse as estatísticas e trouxesse ao mundo um único indivíduo que, já na fase adulta, descobrisse possuir os genótipos de preferência para os 23 genes, ou seja, ser o portador do "ótimo perfil poligênico para resistência". Teoricamente, a exposição deste indivíduo à rotina de atletas maratonistas iria, em pouco tempo, resultar no desenvolvimento de um "fenômeno" das provas de longa

TRANSGÊNICOS – Animais geneticamente modificados e que transmitem as modificações do genoma para gerações subsequentes.

duração. Surpreendentemente, este raciocínio poderia não corresponder à realidade. A complexa interação entre gene e ambiente, somada a detalhes observacionais referentes ao histórico de vida de atletas de elite, sustentam a hipótese de que a máxima contribuição de uma genética extremamente favorável estaria na dependência do tempo de exposição destes genes ao estímulo do treinamento. Simplificadamente, isso equivale dizer que o potencial de resposta dos genes na fase adulta está em parte na dependência do grau da “agressividade” com que estes genes foram estimulados desde a infância.

O *doping* com a transfecção do gene da EPO é pensado no sentido de aumentar a concentração das hemácias e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de oxigênio no sangue. Semelhante a um quadro de *POLICITEMIA*, esta conduta causa sobrecarga de trabalho para o sistema cardiovascular, além de aumentar o risco de morte. Em adição, a diminuição do volume plasmático, como conseqüência da perda hídrica durante o exercício físico, aumenta ainda mais a viscosidade do sangue. Uma fadiga central poderia aparecer precocemente como resultado da sobrecarga de trabalho cardíaco. Se o benefício resultante do aumento da captação de oxigênio pelos tecidos periféricos superasse o desgaste cardiovascular causado pela densidade aumentada do sangue, seria razoável acreditar que o gene da EPO poderia resultar em aumento de *performance* física. No entanto, até o momento não existe comprovação para tal fato.

Alternativamente, um maior fornecimento de oxigênio para o músculo em exercício poderia ser conseguido através do aumento do fluxo sanguíneo local. Uma vez que o NO é responsável por aproximadamente 90% da capacidade de vasodilatação muscular em resposta ao exercício, o gene da eNOS seria um candidato ao *doping* genético. A transfecção com o gene da eNOS para a musculatura esquelética de membros inferiores de atletas de resistência poderia aumentar ainda mais a síntese do NO durante a prova, resultando em, quem sabe, duplicação da vasodilatação. No entanto, queda na pressão de perfusão tecidual e na pressão arterial seriam os possíveis efeitos colaterais causados pelo excesso de resposta vasodilatadora.

No caso do uso da terapia gênica para fins terapêuticos, a preocupação com o efeito fisiológico causado pela transfecção parece não ser relevante a partir do momento em que o gene exógeno teria a função de normalizar a concentração de uma proteína, enzima ou hormônio. Diferente do *doping* genético, na qual a intenção é elevar a concentração da proteína, enzima ou hormônio para valores acima das consideradas fisiológicas. Neste caso, os possíveis efeitos alcançados na amplificação da *performance* física sempre estarão acompanhados de riscos iminentes para a integridade fisiológica do atleta.

## CONCLUSÃO

Os avanços da genômica funcional vêm comprovar o que há tempos eram apenas suspeitas. A excelência no esporte de alto rendimento, dependente em parte da máxima *performance* física, está sob o controle de genes. Embora o rastreamento dos genes moduladores dos complexos fenótipos de *performance* física esteja em andamento, já é possível compreender como variantes em genes específicos modulam as adaptações ao treinamento físico, sustentando as hipóteses do porquê aqueles indivíduos mais responsivos se tornam os “fenômenos” do esporte. A justificativa para a discussão isolada sobre o componente genético do atleta de alto rendimento sustenta-se na dificuldade de se tratar, ao mesmo tempo, de todos os tópicos que modulam estes complexos fenótipos. Parece ter ficado claro no discorrer desta revisão que a excelência

é conseqüência do somatório da máxima *performance* física com a máxima *performance* mental.

Atletas nascem como pessoas comuns e, se estimulados, são naturalmente selecionados para expressar sua máxima *performance* física em modalidades específicas. De forma geral, aqueles portadores de variantes genéticas com potencial influência na capacidade de força/potência, pouco ou nenhuma chance teriam de se destacar em modalidades que exigem da capacidade de resistência. Embora a ciência venha confirmando o fato de que atletas de elite são o resultado de raras combinações genóticas, o mundo do esporte ainda conta com o uso ilícito de substâncias e métodos com potencial em amplificar de forma artificial a *performance* física, além dos limites impostos pela genética. Em se tratando de *doping* genético, o grosso raciocínio de que dois genes produzem o dobro do resultado, justificaria a desenfreada busca pelo método.

**A tecnologia para a manipulação de genes está disponível e a utilização do doping genético visando a criação de atletas geneticamente modificados já é realidade. Laboratórios de biologia molecular, legalizados ou clandestinos, que estejam compactuando com o doping genético, podem estar utilizando-o mesmo sem a garantia de segurança e de resultados positivos para a amplificação da performance física humana.**

A falta de casos comprovados de atletas geneticamente modificados não exclui a possibilidade de que estes atletas já estejam sendo “produzidos” em laboratório, uma vez que a WADA não implementou, até o momento, testes para o anti-*doping* genético. Em adição, estes atletas geneticamente modificados não necessariamente estariam expressando *performance* física superior àquela limite, determinada naturalmente por sua combinação genotípica. Todos os efeitos desejados de amplificação da *performance* física em humanos com o uso da manipulação de genes são baseados em resultados provenientes de estudos com modelos animais ou investigações clínicas. Se estes mesmos resultados seriam replicáveis em indivíduos saudáveis e atletas, esta questão é desconhecida. Observe que no tópico anterior “Animais versus atletas geneticamente modificados” as evidências são provenientes de estudos com modelos animais, o que permite apenas “sugerir” que tais efeitos poderiam ser alcançados em atletas. Para o nosso conhecimento, as técnicas estão disponíveis e atletas geneticamente modificados podem estar circulando pelas arenas de competição. No entanto, não se sabe se esses atletas estariam se beneficiando do *doping* genético. Não existe comprovação de que os genes candidatos ao *doping* resultem em real amplificação da *performance* física em atletas de elite.

As complexas evidências científicas somadas às inúmeras hipóteses geradas não são de fácil interpretação. Os promissores resultados de amplificação da *performance* física em modelos animais têm chamado a atenção daqueles envolvidos e interessados no esporte de alto rendimento. Além de conceitos errôneos, hipóteses e teorias estão sendo propagadas como absolutas verdades. De forma demasiada, as mesmas crenças propagadas para o *doping* convencional estão sendo reproduzidas com o *doping* genético. Fere os princípios éticos a tentativa de investigação do uso da terapia gênica em atletas, com a intenção de comprovar aquelas hipóteses geradas. Mesmo considerando que poucas são as “certezas” relacionadas ao contexto da genética, *performance* física humana e *doping* genético, os conceitos do senso comum não devem sobrepor-se às reais evidências científicas.

---

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

---

*POLICITEMIA* – Aumento do hematócrito. Pacientes com Chuvash *Policitemia* apresentam mutação no gene *VHL*, envolvido na regulação da transcrição do gene da EPO.

## REFERÊNCIAS

1. Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Romer C. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review* 1993;100:363-406.
2. Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature* 2004;431:931-45.
3. Rebbeck TR, Spitz M, Wu X. Assessing the function of genetic variants in candidate gene association studies. *Nat Rev Genet* 2004;5:589-97.
4. Dias RG, Pereira AC, Negrão CE, Krieger JE. Polimorfismos genéticos determinantes da performance física em atletas de elite. *Rev Bras Med Esporte* 2007;13:209-16.
5. Bray MS, Hagberg JM, Perusse L, Rankinen T, Roth SM, Wolfarth B, et al. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2006-2007 update. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41:35-73.
6. Bouchard C, Malina RM, Pérusse L. *Genetics of Fitness and Physical Performance - Human Kinetics*, 1997.
7. Astrup A, Toubro S, Dalgaard LT, Urhammer SA, Sorensen TI, Pedersen O. Impact of the v/v 55 polymorphism of the uncoupling protein 2 gene on 24-h energy expenditure and substrate oxidation. *Int J Obes Relat Metab Disord* 1999;23:1030-4.
8. Wolfarth B, Rivera MA, Oppert JM, Boulay MR, Dionne FT, Chagnon M, et al. A polymorphism in the alpha2a-adrenoceptor gene and endurance athlete status. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1709-12.
9. Williams AG, Folland JP. Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *J Physiol* 2008;586:113-21.
10. Gonzalez-Freire M, Santiago C, Verde Z, Lao JI, Oivian J, Gomez-Gallego F, et al. Unique among unique. Is it genetically determined? *Br J Sports Med* 2009;43:307-9.
11. Winkelmann BR, Russ AP, Nauck M, Klein B, Bohm BO, Maier V, et al. Angiotensinogen M235T polymorphism is associated with plasma angiotensinogen and cardiovascular disease. *Am Heart J* 1999;137:698-705.
12. Alves GB, Oliveira EM, Alves CR, Rached HR, Mota GF, Pereira AC, et al. Influence of angiotensinogen and angiotensin-converting enzyme polymorphisms on cardiac hypertrophy and improvement on maximal aerobic capacity caused by exercise training. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil* 2009;16:487-92.
13. Dias RG, Alvim RO, Rene CR, Alves GB, Pereira AC, Krieger JE, et al. Physical Training does not Influence Vasodilatation Responses in Individuals with M235T AGT and I/D ECA Gene Polymorphisms. The FASEB Journal. (Abstract).
14. Dias RG, Alves MJ, Pereira AC, Rondon MU, Dos Santos MR, Krieger JE, et al. Glu298Asp eNOS gene polymorphism causes attenuation in nonexercising muscle vasodilatation. *Physiol Genomics* 2009;37:99-107.
15. Lippi G, Favaloro EJ, Guidi GC. The genetic basis of human athletic performance. Why are psychological components so often overlooked? *J Physiol* 2008;586:3017; author reply 3019-20.
16. Bryan A, Hutchison KE, Seals DR, Allen DL. A transdisciplinary model integrating genetic, physiological, and psychological correlates of voluntary exercise. *Health Psychol* 2007;26:30-9.
17. Maliuchenko NV, Sysoeva OV, VEDIKOV AM, Timofeeva MA, Portanova GV, Ivanitski AM, et al. Effect of 5HTT genetic polymorphism on aggression in athletes. *Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova* 2007;57:276-81.
18. Raper SE, Chirmule N, Lee FS, Wivel NA, Bagg A, Gao GP, et al. Fatal systemic inflammatory response syndrome in a ornithine transcarbamylase deficient patient following adenoviral gene transfer. *Mol Genet Metab* 2003;80:148-58.
19. Hacein-Bey-Abina S, Le Deist F, Carlier F, Bouneaud C, Hue C, De Villartay JP, et al. Sustained correction of X-linked severe combined immunodeficiency by ex vivo gene therapy. *N Engl J Med* 2002;346:1185-93.
20. Gatzidou E, Gatzidou G, Theocharis SE. Genetically transformed world records: a reality or in the sphere of fantasy? *Med Sci Monit* 2009;15:RA41-7.
21. Gene Therapy Clinical Trials Worldwide - <http://www.wiley.co.uk/genetherapy/clinical/>
22. Schjerling P. Gene doping. *Scand J Med Sci Sports* 2008;18:121-2.
23. Lasne F, Martin L, de Ceaurriz J, Larcher T, Moullier P, Chenuaud P. "Genetic Doping" with erythropoietin cDNA in primate muscle is detectable. *Mol Ther* 2004;10:409-10.
24. Wells DJ. Gene doping: the hype and the reality. *Br J Pharmacol* 2008;154:623-31.
25. Barton ER. Viral expression of insulin-like growth factor-I isoforms promotes different responses in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 2006;100:1778-84.
26. Musaro A, McCullagh K, Paul A, Houghton L, Dobrowolny G, Molinaro M, et al. Localized Igf-1 transgene expression sustains hypertrophy and regeneration in senescent skeletal muscle. *Nat Genet* 2001;27:195-200.
27. Zhou S, Murphy JE, Escobedo JA, Dwarki VJ. Adeno-associated virus-mediated delivery of erythropoietin leads to sustained elevation of hematocrit in nonhuman primates. *Gene Ther* 1998;5:665-70.
28. Wang YX, Zhang CL, Yu RT, Cho HK, Nelson MC, Bayuga-Ocampo CR, et al. Regulation of muscle fiber type and running endurance by PPARdelta. *PLoS Biol* 2004;2:e294.
29. Lunde IG, Ekmark M, Rana ZA, Buonanno A, Gundersen K. PPARdelta expression is influenced by muscle activity and induces slow muscle properties in adult rat muscles after somatic gene transfer. *J Physiol* 2007;582:1277-87.
30. Haidet AM, Rizo L, Handy C, Umapathi P, Eagle A, Shilling C, et al. Long-term enhancement of skeletal muscle mass and strength by single gene administration of myostatin inhibitors. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2008;105:4318-22.
31. McPherron AC, Lawler AM, Lee SJ. Regulation of skeletal muscle mass in mice by a new TGF-beta superfamily member. *Nature* 1997;387:83-90.
32. Lee SJ. Quadrupling muscle mass in mice by targeting TGF-beta signaling pathways. *PLoS One* 2007;2:e789.