

apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



REVISIÓ

Anàlisi dels factors de risc neuromusculars de les lesions esportives

Azahara Fort Vanmeerhaeghe^{a,b}, Daniel Romero Rodríguez^a

^aEscola Universitària de la Salut i l'Esport (EUSES), Universitat de Girona, Girona, Espanya

^bFacultat de Psicologia, Ciències de l'Educació i de l'Esport, Blanquerna, Universitat Ramon Llull, Barcelona, Espanya

Rebut el 21 de gener de 2013; acceptat el 14 de maig de 2013

PARAULES CLAU

Factors de risc;
Lesions esportives;
Prevenció;
Sistema neuromuscular

KEYWORDS

Risk factors;
Sports injury;
Prevention;
Neuromuscular system

Resum L'activitat física, i especialment l'esport de competició, es troben contínuament sota la influència d'una incidència lesiva difícil de disminuir. Aquest article fa una revisió bibliogràfica dels diferents factors de risc neuromuscular que predisposen els esportistes a patir una major incidència lesiva, especialment en els esports en els quals predominen salts, canvis de direcció i variacions de velocitat (acceleracions i desacceleracions). La literatura científica actual destaca, entre altres, la fatiga muscular, l'alteració de la magnitud i dels temps d'activació muscular, l'alteració de la capacitat de coactivació muscular, l'estratègia de control de l'extremitat inferior predominant en el pla frontal, els desequilibris neuromusculars entre la cama dominant i la no dominant, l'*stiffness* (rigidesa) muscular inadequada, els déficits del control postural, la disminució de la propiocepció, els déficits del core i la disminució dels mecanismes d'anticipació. L'anàlisi d'aquests factors de risc proporciona una guia pràctica a l'hora de dissenyar tasques dins d'un pla de prevenció adequat a cada tipus d'especialitat esportiva, i en conseqüència, és útil tant per a entrenadors i preparadors físics com per a fisioterapeutes.

© 2013 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicat per Elsevier España, S.L. Tots els drets reservats.

Anàlisi dels factors de risc neuromusculars de les lesions esportives

Abstract Physical activity and especially competitive sports are continuously affected by a high incidence of injury, which is difficult to reduce. This article reviews the literature on the different neuromuscular risk factors predisposing athletes to suffer a higher incidence of injury, especially in those sports where jumps, changes of direction and high speed changes (acceleration and deceleration) dominate. The current literature emphasizes the following injury risk factors related to control of the neuromuscular system: muscle fatigue, changes in the intensity and time of muscle activation, decreased muscle coactivation, increased dynamic knee valgus, inappropriate muscle stiffness, deficits in postural stability, impaired proprioception, core deficits, neuromuscular imbalances between dominant and senar-dominant leg, and decreased feedforward

*Autor per a correspondència.

Correu electrònic: azaharafort@gmail.com (A. Fort Vanmeerhaeghe).

mechanism. The analysis of these risk factors provides a practical guide for the design of prevention programs for each type of sport, and will be useful for coaches, physical trainers and physiotherapists.

© 2013 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducció

El funcionament correcte del complex sistema neuromuscular exerceix un paper clau en el control de l'estabilitat articular. És important tenir en compte aquest fet des de diferents àmbits relacionats amb l'esport (fig. 1): augment del rendiment esportiu, prevenció de lesions i readaptació a la competició esportiva després d'una lesió¹⁻³.

Actualment diversos treballs han mostrat com l'entrenament neuromuscular ha aconseguit millorar diferents capacitats relacionades amb aquest sistema, com ara la sensació de posició i moviment articular, els patrons d'activació muscular i qualitats físiques com la força i l'equilibri⁴⁻⁷. A més, darrerament hi ha molts treballs que constaten la reducció del nombre de certes lesions esportives gràcies a un entrenament del control neuromuscular⁸⁻¹⁰. Actualment no hi ha consens sobre el tipus d'entrenament neuromuscular més adequat, tot i que si tenim en compte el principi d'especificitat, cada grup de població necessita un tipus d'entrenament adequat a les seves característiques i exigències esportives. Abans de dissenyar qualsevol programa d'entrenament d'aquest tipus és important entendre el concepte de control neuromuscular en sentit ampli. La figura 2 explica l'estreta relació existent entre aquest concepte i els termes «entrenament», «estabilitat articular» i «sistema sensoriomotor»^{2,6,11}.

El control del sistema neuromuscular depèn directament del complex sistema sensoriomotor. Aquest sistema incorpora tots els receptors i vies aferents, el procés d'integració i de processament central i les respostes eferents, amb l'objectiu de mantenir l'estabilitat funcional de l'articulació durant els moviments esportius¹². En relació amb el procés neurosensorial, malgrat que el sistema visual i el vestibular contribueixen de manera important al control neuromuscular, els mecanoreceptors perifèrics (especialment els receptors musculars) han estat descrits com les estruc-

tures més modificables mitjançant l'entrenament esportiu^{2,13}. Aquesta informació aferent és processada i integrada a partir de 3 nivells de control motor (medul·la espinal, tronc cerebral i escorça cerebral) i s'associa a diverses àrees, com el cerebel. En funció del nivell de control motor escollit hi pot haver 3 tipus de respostes motores: molt ràpides (resposta reflexa, medul·la espinal), intermèdies (automàtiques, tronc de l'encèfal) i més lentes (més elaborades, voluntàries, escorça cerebral). Aquestes respostes són regulades per 2 mecanismes de control motor, propis de tot individu i que poden desenvolupar-se mitjançant l'entrenament. Aquests mecanismes, coneguts en llengua anglesa com a *feedback* (retroalimentació) i *feedforward* (preactivació), es desenvolupen de manera contínua a partir de les experiències motores^{2,3,13}. El control de retroalimentació es refereix a la resposta proporcionada bé per via reflexa o bé després de l'anàlisi d'un determinat estímul sensorial. D'altra banda, els mecanismes de control de preactivació són descrits com les accions d'anticipació o preactivació que tenen lloc abans de la detecció sensorial d'una disrupció de l'homeòstasi i que es basen en experiències anteriors.

Finalment, també és important diferenciar entre el concepte de propiocepció i control neuromuscular, tots 2 integrats dins del sistema sensoriomotor². A partir de les diferents definicions que podem trobar en la literatura científica^{1,2,13,14}, en aquesta revisió definim la propiocepció com el tipus de sensibilitat del sistema somatosensorial que té com a principal objectiu participar en el manteniment de l'estabilitat dinàmica de l'articulació, la qual cosa s'aconsegueix mitjançant la detecció de les variacions de pressió, tensió i longitud dels diferents teixits articulars i musculars¹⁵. D'altra banda, el control neuromuscular, terme central d'aquesta revisió, es defineix com l'activació muscular precisa que possibilita el desenvolupament coordinat i eficaç d'una acció¹⁵.

Amb l'objectiu de dissenyar plans d'entrenament neuromuscular òptims en els diferents àmbits de l'esport, especialment en el de prevenció i readaptació de lesions esportives, té una importància vital analitzar els diferents factors de risc relacionats amb el sistema sensoriomotor i el funcionament correcte del control neuromuscular.

L'objectiu principal del present estudi és realitzar una revisió de la bibliografia científica actual sobre els diferents factors de risc d'origen neuromuscular que predisposen els esportistes a sofrir una major incidència lesiva de l'extremitat inferior. Especialment, el text es basa en els esports en els quals predominen les recepcions de salts, els canvis de direcció i les situacions d'acceleració i desacceleració.



Figura 1 Àmbits d'aplicació de l'entrenament del control neuromuscular en relació amb l'esport.

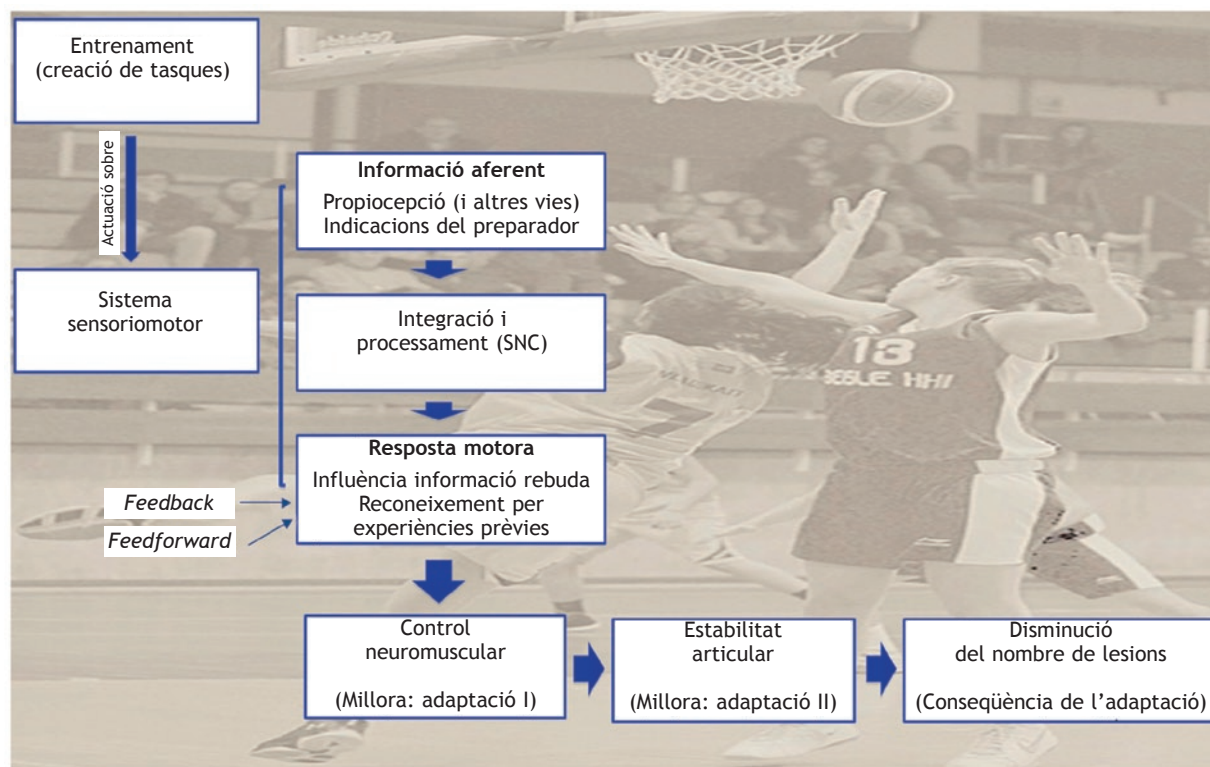


Figura 2 Relació entre els conceptes d'entrenament, sistema sensoriomotor, estabilitat articular i control neuromuscular en la prevenció de lesions.

Material i mètodes

La revisió bibliogràfica es realitzà principalment a la base de dades PUBMED fins a maig de 2012. Els principals algorismes de cerca utilitzats foren: «neuromuscular risk factors AND sport», «neuromuscular risk factors AND athletes» i «sports injury risk factors». També es van examinar les llistes de referències dels articles escollits. Solament es van incloure els articles en llengua espanyola o anglesa.

Incidència lesiva i control neuromuscular

És coneguda la gran incidència lesiva en l'esport de competició^{16,17}. Algunes de les lesions amb major presència són el trencament del lligament encreuat anterior (LEA) i el trencament del lligament lateral del turmell. Aquests casos poden associar-se a un augment de la morbiditat en l'esport (p. ex., artrosi prematura del genoll) i discapacitat a llarg termini^{18,19}. És important destacar que aquest tipus de lesions articulars són les que més poden beneficiar-se de l'entrenament del control neuromuscular¹⁰.

Una de les classificacions més genèriques dels factors de risc de les lesions esportives els divideix en intrínsecs i extrínsecs¹⁶. Com a factors extrínsecs s'inclouen, entre altres, l'equipament utilitzat i les condicions ambientals existents en un entrenament o competició. D'altra banda, entre els factors intrínsecs podem enumerar l'edat, el sexe, la composició corporal i les característiques anatòmiques de determinades estructures, encara que també se'n

relacionen d'altres més vinculats a les capacitats físiques de l'esportista, com poden ser la falta de força i una capacitat coordinativa pobre. Sense deixar de banda la classificació comentada, és important destacar, en relació amb la present revisió, que la lesió de l'LEA sense contacte permet classificar els factors de risc en 4 categories: ambiental, anatòmica, hormonal i neuromuscular; aquesta última, segons la bibliografia científica actual, és considerada com la més influenciable per l'entrenament²⁰. Atès que l'origen de les lesions esportives és habitualment multifactorial, la primera estratègia de prevenció consisteix en realitzar una anàlisi prèvia de tots aquests factors^{17,21}.

A continuació ens centrarem en el nostre motiu principal d'estudi, el control neuromuscular, que depèn al seu torn de diversos factors de risc intrínsecs que poden ser modificables amb l'entrenament, tal com ja hem apuntat. La lesió esportiva per mecanisme sense contacte més estudiada en la literatura científica és el trencament de l'LEA. Per aquest motiu ens centrarem majoritàriament en aquesta lesió com a exemple per explicar la implicació del sistema neuromuscular en la prevenció de lesions de l'extremitat inferior⁹.

Lesions esportives de l'extremitat inferior: factors de risc neuromuscular

A la taula 1 s'estableix una classificació dels principals factors de risc neuromuscular associats a lesions en l'esport.

Taula 1 Factors neuromusculars de risc de lesió de l'extremitat inferior

Fatiga neuromuscular

Alteració de la intensitat i del temps d'activació muscular

Temps de reacció de la musculatura peroneal
Desequilibris en l'activació dels músculs medials i laterals de quàdriceps i isquiosurals
Major activació de la musculatura quadricipital versus la isquiosural
Dèficits en l'activació muscular del maluc
Dèficits en l'estabilitat i activació muscular del tronc

Alteració de la capacitat de coactivació muscular

Estratègia de control dinàmic de l'extremitat inferior: predominança en el pla frontal respecte al sagital
Augment del valg dinàmic de genoll

Desequilibris neuromusculars entre cama dominant i no dominant

Inadequada stiffness muscular

Dèficits del control de l'estabilitat postural

Alteració de la sensibilitat propioceptiva

Disminució dels mecanismes d'anticipació o preactivació (feedforward)

Aquests factors de risc neuromuscular tenen un denominador comú: l'alteració del patró de moviment (fig. 3). El patró de moviment, referit a la seqüència d'activació muscular utilitzada per generar una acció, ha estat estudiat en esportistes per veure la possible relació amb l'aparició d'algunes lesions, sobretot a les extremitats inferiors. Aquest àmbit d'estudi s'ha focalitzat especialment en detectar possibles diferències entre les accions desenvolupades entre homes i dones, i tot i que hi ha alguna publicació que ressalta la similitud d'incidència lesiva entre gèneres²², són diversos els estudis que parlen d'un major nombre de lesions en les dones esportistes^{9,23,24}. D'aquesta manera, se sap que les lesions articulars de genoll i turmell predominen en dones¹⁷, i més concretament es detalla una major incidència lesiva d'afeccions com el dolor anterior del genoll²⁴, els trencaments de l'LEA^{25,26} i els esquinços de grau I del lligament lateral del turmell²⁷.

La literatura especialitzada identifica les hormones sexuals, l'anatomia de la dona i els desequilibris neuromusculars (en són exemple els dèficits en el control postural, la propiocepció o la força de la musculatura del maluc) com a principals factors intrínsecs que expliquen la major incidència de lesions en el sexe femení^{9,23}. A més, s'ha de prendre especial precaució en esportistes joves, ja que aquesta població s'associa a un major nombre de lesions de l'LEA, especialment en adolescents que practiquen esports amb abundants canvis de direcció com són el futbol, el bàsquet i l'handbol²⁵⁻²⁹. Per tant, és especialment important l'anàlisi dels factors de risc en la fase puberal, ja que ocorren canvis molt significatius a nivell anatòmic i hormonal que no sempre van associats a una millora del control neuromuscular. Concretament, és important tenir en compte que els canvis musculoesquelètics produïts poden alterar



Figura 3 Relació entre l'alteració del patró de moviment amb diferents factors de risc neuromuscular (Foto extreta de «masBasket»).

la laxitud de les estructures articulars passives, provocant una disminució de l'estabilitat dinàmica de l'articulació⁹.

A continuació s'analitzen els diferents factors que relacionen la incidència lesiva amb l'alteració dels patrons de moviment, és a dir, amb la forma en què els esportistes organitzen la programació i l'execució de les accions esportives.

Fatiga neuromuscular

La fatiga, entesa des de fa anys com un procés en el qual es produeix una disminució progressiva de la capacitat de generar potència³⁰, provoca una alteració de la capacitat de control neuromuscular de l'esportista. Diversos estudis han registrat que després d'un exercici fatigant i durant les recepcions de diferents tipus de salts, tant en homes com en dones, es produeix un canvi en les estratègies de control neuromuscular utilitzades per aquests subjectes³¹⁻³⁴. Aquestes variacions del control motor s'associen a diferents factors de risc de lesió, tals com una flexió menor de genoll i maluc, un augment del valg de genoll, una major força de reacció del sòl i la necessitat d'un temps d'estabilització major³⁴⁻³⁶.

En relació amb la lesió de l'LEA, diferents estudis mostren que un exercici fatigant pot conduir a algunes de les

variacions descrites de control motor, fet que pot augmentar el mecanisme de cisallament anterior tibial i, per tant, provocar un increment de tensió i possible lesió de l'LEA, tant en homes com en dones^{32,33}. En aquesta línia, Small et al.³⁷ observaren que en la fase final d'una simulació d'un partit de futbol disminuïa el moment pic de força de la musculatura isquiosural. Segons aquests autors, aquest canvi indica una disminució de l'estabilitat articular del genoll, i provoca una alteració del control motor i, per tant, un risc major de lesió articular. Simultàniament a aquest fet, aquests mateixos autors destaquen la major predisposició a lesions d'aquesta musculatura, especialment en accions d'esprint. En relació amb aquest fet, el treball esmentat destaca el dèficit de força excèntrica, sobretot després d'exercicis fatigants, com un factor de risc de lesió de la musculatura isquiosural.

A més d'aquestes variacions relacionades amb el genoll, és destacable l'efecte de l'exercici fatigant del turmell, alterant la sensació de posició articular d'aquesta estructura i l'activació de la musculatura peroneal. Aquests fets poden afavorir el risc de lesió de l'articulació del turmell^{38,39}.

Alteració de la intensitat i del temps d'activació muscular

Hi ha nombrosos estudis, realitzats majoritàriament mitjançant electromiografia, que mostren com l'alteració de la magnitud i el temps d'activació muscular durant diferents accions esportives poden predisposar a una incidència lesiva major. A continuació tractarem alguns dels casos més descrits per la bibliografia actual.

Temps de reacció de la musculatura peroneal

És important destacar l'estudi de Menacho et al.⁴⁰, que realitzaren una revisió sistemàtica amb l'objectiu de comparar el temps de reacció de la musculatura peroneal en turmells sans versus lesionats. Amb aquesta finalitat s'avaluà de forma electromiogràfica la reacció de la musculatura esmentada durant un test que consistia en una inversió sobtada del turmell. Els autors registren un temps de reacció major de la musculatura peroneal en els turmells lesionats respecte als turmells sans. Aquest mateix any, un altre grup d'investigadors revisà de forma sistemàtica els estudis que relacionaven els diferents components del sistema sensoriomotor amb la inestabilitat funcional del turmell. Aquests autors van concloure que no hi ha evidència sobre la relació entre un temps de reacció menor de la musculatura peroneal i la inestabilitat funcional del turmell, tot i que es relaciona amb dèficits en el control postural i la sensació de posició articular del turmell⁴¹.

Desequilibris en l'activació dels músculs medials i laterals de quàdriceps i isquiosurals

Els desequilibris entre la part medial i lateral de la musculatura han estat descrits com a factors de risc de lesió, i aquesta dada ha estat registrada especialment en la musculatura quadricipital⁴² i isquiosural⁴³. D'aquesta manera, Myer et al.⁴² estudiaren el patró d'activació del quàdriceps en una posició de risc de lesió de l'LEA en ambdós sexes.

Els resultats mostren que les dones, a diferència dels homes, activen més la part lateral del quàdriceps, estratègia d'activació que contribueix al valg dinàmic de genoll i facilita el trencament de l'LEA, especialment si s'associa un predomini d'activació de la part lateral de la musculatura isquiosural^{25,43}.

En relació amb la síndrome de dolor femororotulià, diversos estudis mostren que una magnitud menor i un temps d'activació muscular major del vast medial respecte al vast lateral s'associen a una incidència major d'aquest tipus de lesió^{24,44-46}.

Major activació de la musculatura quadricipital versus la isquiosural

Hi ha diversos treballs que identifiquen com a factor de risc de lesió de l'LEA una activació excessivament predominant del quàdriceps en les accions de recepció del salt i/o canvis de direcció i acceleració^{1,20,25} respecte als isquiotibials. L'alta activitat dels quàdriceps amb la menor activació dels isquiosurals, especialment en accions excèntriques, pot produir importants desplaçaments anteriors de la tibia. Tal com hem comentat, diferents autors demostren que les dones tendeixen a activar preferentment els extensors de genoll respecte als flexors quan cal donar estabilitat articular en els moviments esportius^{1,20,47,48}. Aquest fet accentua i perpetua possibles desequilibris de força i d'activació d'aquests músculs.

Dèficits de l'activació muscular del maluc

Els dèficits de l'activació muscular del maluc s'han associat a un nombre de lesions major, com la síndrome de dolor femororotulià^{24,49}, la lesió de l'LEA^{48,50} i la síndrome de la banda iliotibial⁵¹.

Prins i van der Wurff⁴⁹ realitzaren una revisió sistemàtica de la relació existent entre la debilitat de la musculatura del maluc i la síndrome de dolor femororotulià de les dones. Els autors conclouen que hi ha evidència de la forta relació existent entre aquesta síndrome i el dèficit de força dels músculs extensors, rotatoris externs i abductors de maluc en comparar-los amb els de dones sanes.

A més del problema existent en l'aparell extensor, és destacable la major incidència de lesió de l'LEA en el sexe femení durant els canvis de direcció i recepcions de salts. En aquestes accions, a més de produir-se major valg dinàmic i rotació externa del genoll, té lloc una major adducció i rotació interna del maluc^{48,50,52}, i a aquests fets s'afegeix una major pronació del peu⁴⁸. Com ja hem comentat, l'alteració de l'activació muscular proximal del maluc es relaciona amb un major valg dinàmic en les dones durant les accions de recepció^{48,53}. En relació al fet anterior, Zazulak et al.⁴⁸ van comparar els patrons d'activació muscular en la recepció del salt unipodal entre homes i dones. Els resultats mostren que les dones disminueixen l'activació del gluti major i augmenten la del recte femoral durant la recepció. Aquesta major implicació del quàdriceps comporta un augment del lliscament tibial anterior, la qual cosa pot contribuir a una major predisposició del sexe femení a sofrir una lesió de l'LEA per un mecanisme sense contacte.

El treball de Leetun et al.⁵⁴ també es troba en aquesta línia i s'hi observa que els esportistes que havien registrat

un nombre menor de lesions de l'esquena i de l'extremitat inferior foren els que van presentar nivells majors de força dels abductors i rotatoris externs de maluc. És clar, doncs, que la debilitat del gluti mitjà és un dels factors que predisposa l'esportista a sofrir una lesió, però és a més molt important destacar el rol del gluti major, que és el principal extensor i a més un rotatori extern i abductor considerable del maluc. L'acció muscular excèntrica d'aquest múscul té un paper rellevant en el control de la ja constatada rotació interna excessiva del maluc en dones. A més, la musculatura proximal d'aquesta articulació, especialment el conjunt dels glutis, té un gran paper en el posicionament de l'extremitat inferior i en la capacitat d'absorbir energia durant les accions de recepció⁴⁸. Relacionat amb això últim, és important destacar el rol importantíssim dels músculs del maluc tant en la transferència de la força de l'extremitat inferior a la pelvis i la columna com en l'estabilització del tronc i de la pelvis⁵⁵. Com veurem en apartats posteriors, i en relació amb el dèficit de la musculatura del tronc i de la pelvis, aquest també s'associa amb un factor de risc de lesió de l'extremitat inferior⁵⁶.

Dèficits de l'estabilitat i activació muscular del tronc

En els últims anys el dèficit del sistema sensoriomotor de la zona coneguda amb el terme anglès de *core* ha estat associat a un risc major de lesió de les extremitats inferiors^{28,54,55}.

El concepte de *core* com a zona anatòmica inclou les estructures passives de la pelvis i la columna toracolumbar i la musculatura del tronc com a sistema actiu⁵⁷. Més concretament, Akuthota i Nadler⁵⁸ descriuen aquest concepte com una caixa on es troba la musculatura abdominal a la part anterior, els glutis i els paravertebrals a la part posterior, el diafragma com a sostre i la musculatura del sòl pèlvic i la cintura pèlvica a la zona inferior. Kibler et al.⁵⁶ inclouen la columna, el maluc i la pelvis com a estructures òssies i articulars, i a més de la musculatura abdominal, afegeixen també la musculatura proximal de l'extremitat inferior, fet que destaca la important interacció entre aquesta zona i les extremitats.

Actualment no existeix una definició universal del concepte d'estabilitat del *core*. Kibler et al.⁵⁶ la defineixen com l'habilitat de controlar la posició i el moviment del tronc per sobre de la pelvis i les extremitats inferiors. A més, té l'objectiu de permetre la producció òptima de força així com la transferència i el control als segments distals que contribueixen de manera integrada a les cadenes cinètiques utilitzades en els moviments esportius. Leetun et al.⁵⁴ es refereixen a l'estabilitat del *core* com el producte entre el control motor i la capacitat muscular del complex lumbar-pelvis-maluc. Aquest concepte emfatitza la importància de la coordinació a més de la força i la resistència d'aquesta zona.

La forma mitjançant la qual un dèficit en el control de tronc pot influir negativament en l'estabilitat de l'extremitat inferior ha estat detallada en diferents treballs. Així, s'ha vist, per exemple, que l'alteració del control del tronc pot portar a un augment del valg de genoll, tot predisposant aquesta articulació a sofrir tensions mecàniques majors^{57,59}. En aquesta línia, Zazulak et al.⁵⁷ observaren que la disminució de la propiocepció i del control

neuromuscular del tronc podien predir un major risc de lesions del genoll en les dones, encara que no van registrar aquesta relació en els homes estudiats. Aquest fet ens enllaça amb la ja comentada major alteració propioceptiva de les dones en comparació amb el gènere masculí.

Si seguim la seqüència de raonament del paràgraf anterior, Myer et al.²⁸ identifiquen el *core* corporal com un modulador crític de l'alineació de l'extremitat inferior i de les càrregues que pateix durant les accions dinàmiques. D'aquesta manera, resulta molt interessant que suggereixin que un dèficit de preactivació de la musculatura del tronc i dels estabilitzadors de maluc pot augmentar les posicions o moviments laterals del tronc i portar així a un increment de les càrregues d'abducció sobre el genoll. És clar que encara que aquesta relació descrita en el pla frontal és molt plàstica, no és l'única que es produeix, de manera que els mateixos autors destaquen que els dèficits de control del tronc poden augmentar els mecanismes de lesió de l'LEA, especialment en dones esportistes.

Segons el que s'ha comentat en aquest punt, la suma d'un dèficit del control de tronc (alteració del concepte *core*) del gènere femení produeix un augment important de la possibilitat de sofrir una lesió de l'extremitat inferior. Si a aquests 2 fets hi afegim una edat situada en la fase puberal, el risc lesiu augmenta. Aquesta circumstància ve produïda per un augment de les estructures òssies, de l'alçada i de la massa corporal en aquestes edats, i aquests fets no s'associen sempre a un augment de la força i del reclutament de la musculatura del maluc i del tronc. Tota aquesta situació pot dificultar el control del moviment del tronc durant les accions dinàmiques, i és un dels fets que s'associa amb el valg dinàmic major observat en les dones adolescents durant les accions esportives intenses²⁸, tal com hem comentat anteriorment.

Alteració de la capacitat de coactivació muscular

La coactivació de la musculatura quadricipital i isquiosural pot protegir l'articulació del genoll, i no solament contra l'excés de desplaçament anterior tibial, sinó també contra el valg dinàmic de l'extremitat inferior^{59,60}. Aquest efecte protector ocorre gràcies a l'augment d'estabilitat articular que es produeix en l'activació simultània de la musculatura agonista antagonista al voltant del genoll, i és important comprendre que els dèficits de força i de temps per aconseguir una activació màxima de la musculatura isquiosural limiten la possibilitat de coactivació muscular i, per tant, l'efecte de protecció comentat^{11,61}.

Lloyd et al.⁶² estudiaren els diferents patrons musculars creats durant els moments d'adducció i abducció del genoll en els canvis de direcció, els quals s'associen a situacions d'alt risc de lesió. Malgrat que les desviacions de la cama en el pla frontal són tractades de manera específica en aquest text, és important destacar que aquests autors van concloure que l'estratègia neuromuscular que suporta millor aquests moments produïts en el genoll s'aconsegueix mitjançant una coactivació de la musculatura quadricipital i isquiosural.

Segons el que s'ha comentat en els 2 paràgrafs anteriors, hem d'entendre que l'efecte de coactivació al voltant del

genoll facilita la protecció d'aquesta articulació en les accions esportives desenvolupades amb preferència tant en el pla sagital com en el frontal.

Estratègia de control dinàmic de l'extremitat inferior: predominança en el pla frontal respecte al sagital

Diverses investigacions han mostrat que les dones, en comparació amb els homes, tenen una pitjor estratègia de control dinàmic de l'extremitat inferior. Les esportistes tendeixen a prioritzar un control de l'extremitat inferior basat en el pla frontal, és a dir, intenten absorbir la possible energia lesiva pròpia dels suports i les recepcions mitjançant adaptacions corporals en aquest pla (valg dinàmic de genoll). Se sap que aquesta estratègia està equivocada perquè és ineficaç en l'intent de minimitzar les forces de reacció del sòl^{1,63-65}.

En aquesta línia, Lephart et al.⁵⁰ observaren que el gènere femení tenia menys capacitat d'absorbir les forces verticals d'impacte després del salt, cosa que correlacionaren amb una flexió menor i control del genoll en la recepció i amb una debilitat de la musculatura quadricipital i isquioural.

Igualment, el grup de Wikstrom et al.⁶⁵ també observaren que les dones absorbien de forma menys eficaç les forces de reacció del sòl, i ho van relacionar també amb una flexió menor del genoll. Malgrat aquests resultats, les dones obtingueren un índex millor de control postural dinàmic en comparació amb els homes, fet que no està directament relacionat amb la capacitat d'absorció d'una energia lesiva potencial.

En aquest sentit, Nyland et al.⁶⁶ estudiaren com els subjectes amb valg major o var de genoll en el pla frontal durant l'equilibri unipodal desenvolupen diferents estratègies neuromusculars, les quals poden predisposar un risc major de lesió de l'extremitat inferior.

Finalment dins d'aquest punt, és important destacar el treball de Ford et al.⁶⁷, en el qual es van comparar les diferències de gènere en els paràmetres cinemàtics produïts en canvis de direcció inesperats en esportistes adolescents. En aquest treball els autors també registraren en el gènere femení un increment major dels angles de genoll i turmell en el pla frontal en comparació amb els nois, fet que podria explicar una incidència lesiva major en les joves esportistes.

Augment del valg dinàmic del genoll

Molt relacionat amb el punt anterior, i en part com a conseqüència, és important destacar l'existència del valg dinàmic de genoll esmentat com una alteració en l'estratègia de control neuromuscular durant les accions esportives. En relació amb aquest fet, és important diferenciar l'anomenat valg anatòmic del valg dinàmic a què ens referim. Com mostren els resultats de McLean et al.⁶³, els subjectes amb major valg anatòmic detectat en una exploració estàtica no es correlacionen amb un major valg en accions dinàmiques com la sortida oberta, el salt lateral o la recepció del salt unipodal. Segons els resultats d'aquest estudi, pot deduir-se que el valg funcional durant les accions esportives més

aviat té un origen centrat en l'estratègia neuromuscular desenvolupada que una justificació anatòmica.

Aquest valg dinàmic, associat a una estratègia de control motor en el pla frontal, podria ser secundari a una disminució de la funció dels abductors de maluc⁵³. L'augment del valg de genoll i rotació externa de la tibia, juntament amb una adducció i rotació interna de maluc, es poden associar tant a lesions agudes de genoll (Ireland et al.⁶⁸, amb el seu concepte de «posició de no retorn») com a lesions cròniques^{24,48,49}.

Desequilibris neuromusculars entre la cama dominant i la no dominant

Un dels dèficits de control neuromuscular que s'observa sovint en les esportistes femenines és el desequilibri entre les extremitats inferiors (cama dominant - no dominant) a nivell de força, coordinació i control postural⁶⁹. A més, és important tenir en compte que aquestes diferències poden ser encara més determinants en esportistes que han sofert una lesió, cosa que facilita, per exemple, la recidiva de l'LEA⁷⁰ o del lligament lateral extern del turmell⁷¹.

En la mateixa línia, i tot i que l'estudi de Wikstrom et al.⁶⁵ no registrà diferències significatives entre la cama dominant i la no dominant en diferents tests de control postural dinàmic (salt vertical, salt unipodal i manteniment de l'equilibri durant 3 s) en 40 individus sans d'ambdós sexes, diverses referències en remarquen les diferències. Entre els treballs que destaquen les diferències entre la cama dominant i la no dominant figuren els de Hewett et al.^{1,72}, que observaren que la cama no dominant sol tenir una musculatura més feble i amb menys coordinació que la dominant, especialment en el sexe femení i en les tasques de recepció, pivotar i desacceleració en el salt unipodal. En aquesta línia, Ross et al.⁶⁴ van estudiar les diferències de força, equilibri i rang de moviment de la flexió de genoll entre la cama dominant i la no dominant durant la recepció unipodal en 30 individus d'ambdós sexes físicament actius. Malgrat que no van trobar diferències significatives en el temps d'estabilització de la recepció del salt entre ambdues cames, els autors conclogueren que l'absorció de les forces de reacció del sòl, l'equilibri i la força muscular foren superiors en la cama dominant. Un altre dels treballs que mostren aquesta tendència resulta d'una comparació de la cama dominant - no dominant en un grup de 20 homes i dones físicament actius⁷³. Tot i no haver trobat diferències significatives en les proves d'equilibri unipodal amb els ulls oberts i tancats i en la recepció del salt unipodal, es van trobar aquestes diferències quan es comparà separatament el grup de dones, i es mostrà un control menor del centre de pressions en la recepció del salt en la cama no dominant respecte a la dominant.

Aquests fets fan pensar que les accions de recepció del salt i equilibri monopodal realitzades amb l'extremitat no dominant poden facilitar l'existència d'un nombre de lesions major.

Stiffness muscular inadequada

El concepte de rigidesa (*stiffness*), entès com la capacitat biomecànica del múscul d'oposar-se a l'estirament i con-

trari a la compliància⁷⁴, juga un rol molt important en la capacitat de generar força explosiva. Diversos estudis mostren que els homes tenen més rigidesa muscular en comparació amb les dones en les activitats en què predominen els canvis de direcció i les pertorbacions de l'equilibri⁷⁵⁻⁷⁸.

Aquesta propietat, quan la relacionem únicament amb l'activació de la musculatura periarticular, és un component important per a l'estabilitat de l'articulació^{77,79}. Aquest concepte, al qual podem referir-nos com rigidesa activa i que és proporcional a l'activació mioelèctrica i a la força generada pel múscul⁷⁵, és important diferenciar-lo de la rigidesa muscular passiva, donada per la capacitat elàstica del conjunt muscular. Atès el component estabilitzador de l'articulació, l'*stiffness* (rigidesa) muscular menor de les dones podria augmentar el risc de lesió, especialment quan afegim més laxitud articular del gènere femení, factor que també sol relacionar-se amb un major risc lesiu^{80,81}.

Tot i que aquesta rigidesa menor de les esportistes és un factor de risc de lesió, hi ha autors que expliquen que el reclutament neuromotor pot ser utilitzat per contrarestar aquesta limitació durant les activitats esportives, millorant d'aquesta manera l'estabilitat articular⁷⁶.

Dèficits del control de l'estabilitat postural

El dèficit en el control de la posició del centre de gravetat ha estat descrit com un important factor de risc de lesió de l'extremitat inferior. Aquest fet s'explica si considerem que l'augment de fluctuació d'aquest centre s'associa amb una falta de capacitat d'estabilització corporal, la qual cosa es relaciona amb una alteració de l'estratègia de control neuromuscular.

Malgrat que hi ha alguns treballs que no relacionen la disminució del control postural amb un major nombre de lesions traumàtiques^{82,83}, és més abundant la bibliografia que relaciona aquests 2 casos, especialment en el cas de l'esquinç de turmell⁸⁴. D'aquesta manera, i tenint en compte que la falta d'estabilitat augmenta les forces que es transmeten a les estructures articulars i musculars⁸⁵⁻⁸⁸, s'ha vist una relació significativa entre l'existència de lesions prèvies i la disminució de l'estabilitat postural^{70,89-93}. Patern et al.⁷⁰ estudiaren la relació entre dèficits del sistema neuromuscular i el risc de sofrir una segona lesió de l'LEA en 53 joves esportistes. Al cap d'un any de la lesió 13 dels joves estudiats es van tornar a trencar el mateix LEA. Els autors relacionen aquesta recidiva de la lesió amb una menor estabilitat postural de la cama afectada i un menor control de les articulacions del genoll i el maluc durant un *drop jump*.

A aquestes dades s'hi afegixen diferents treballs que han registrat una relació entre una estabilitat postural disminuïda i un risc major de sofrir lesions esportives^{92,94,95}. Semblantment, Plisky et al.⁹⁵ estudiaren la relació entre els resultats obtinguts mitjançant un test d'equilibri unipodal dinàmic (*Star Excursion Balance Test* [SEBT]) i la incidència lesiva de l'extremitat inferior en 235 jugadors joves de bàsquet. Els resultats indicaren que els jugadors que tenien una diferència superior a 4 cm entre cames en la distància aconseguida de forma anterior tenien 2,5 vegades més risc de sofrir una lesió de l'extremitat inferior.

És important destacar que els tests utilitzats per valorar

l'equilibri en els diferents treballs, ja sigui de manera estàtica o dinàmica, són molt variables, fet que podria explicar els diferents resultats obtinguts entre els estudis.

Alteració de la sensibilitat propioceptiva

Tot i tenir present que una alteració propioceptiva es pot mostrar de diverses maneres en una articulació com el genoll, l'exemple més freqüentment utilitzat és explicar el dèficit propioceptiu de l'LEA quan es tensa¹¹, el que fa que no actuï la musculatura isquiosural per protegir de manera correcta el genoll i més concretament el lligament esmentat.

Tenint en compte la idea comentada en el paràgraf anterior, Hewett et al.⁵ estudiaren les diferències de gènere en el control de l'estabilitat unipodal en subjectes sans, i arribaren a la conclusió que les dones tenien una capacitat d'estabilització major en comparació amb els homes estudiats. En canvi, quan aquests autors van estudiar esportistes amb un dèficit de l'LEA, els homes tenien més estabilitat en comparació amb les dones en els tests preoperatoris realitzats. Una vegada feta la reparació quirúrgica del lligament, els homes seguien tenint més estabilitat als 6, 9 i 12 mesos. Els autors suggereixen que aquest fet es pot associar amb una disminució més accentuada en el sexe femení de la sensibilitat propioceptiva de l'LEA lesionat.

En un altre estudi, Rozzi et al.⁴³ valoraren la laxitud articular, la propiocepció, l'equilibri i el temps necessari per aconseguir la tensió màxima muscular en 34 homes i dones esportistes, així com el seu patró d'activació muscular en diferents proves realitzades. Els resultats van mostrar que, comparades amb els homes, les dones esportistes tenien més laxitud articular i els calia més temps per detectar canvis en la posició articular (pitjor propiocepció), tot i que tenien més capacitat per mantenir el suport monopodal, la qual cosa denota millor equilibri. És evident que la major capacitat per mantenir una posició no és sinònim de poder actuar ràpidament davant una pèrdua d'equilibri, i és important tenir en compte que, especialment en esports de situació, les pèrdues d'equilibri són constants.

També és interessant destacar el grup de Robert et al.^{14,96}, el qual observà que els genolls postintervenció de l'LEA tenien un major llinar de detecció del moviment passiu d'extensió del genoll (prova utilitzada per valorar la propiocepció) en comparació amb els genolls no operats. Aquest fet, que indica un retard en la capacitat de notar tensió en el lligament, està relacionat amb un risc major de recidiva¹⁷.

Disminució dels mecanismes d'anticipació (*feedforward*)

Als conceptes als quals ens hem referit i que estan relacionats, d'una forma genèrica, amb el control neuromuscular, hi hem d'afegir 2 nous mecanismes que influeixen en el control dinàmic de l'articulació, i que en anglès són coneguts com a *feedback* (via reflexa) i *feedforward* (anticipació, preactivació)^{3,13,15,97,98}.

En relació amb l'anomenat *feedback*, hem de tenir en compte que es tracta d'un estímul sensorial al qual respon

la musculatura, sovint de manera reflexa. Però en accions esportives de màxima velocitat, especialment en les pròpies dels esports de situació que es succeeixen de manera continuada i amb una marcada variabilitat, aquest mecanisme té una eficàcia limitada en la intenció de protegir l'organisme de patir una lesió. A més de la lentitud relativa per poder evitar l'efecte d'un mecanisme lesiu, el feedback pot veure's afectat de manera important per la insaturació de fatiga, tot augmentant el retard electromecànic de la musculatura esquelètica que porta a una disminució de la protecció articular que aquesta musculatura desenvolupa. D'altra banda, el mecanisme de retroalimentació és adequat per mantenir la postura i accions desenvolupades més lentament.

També, el mecanisme de control de preactivació és descrit com la capacitat d'anticipació d'un subjecte sense que es produeixi el registre sensorial que provoca una resposta reflexa (*feedback*), sinó que es basa en la identificació d'una situació que el subjecte relaciona amb experiències anteriors. D'aquesta manera, la preactivació muscular que s'aconsegueix té la capacitat de protegir les estructures de l'aparell locomotor d'una càrrega lesiva. Aquesta preparació del sistema musculoesquelètic s'arriba a produir gràcies a l'experiència comentada de situacions esportives viscudes, i en facilitarà l'aprenentatge continu, que són prèvies (amb un espai de temps mínim) a la presentació de les càrregues lesives.

Actualment hi ha diverses publicacions que indiquen la importància dels moviments d'anticipació a l'hora de minimitzar les pertorbacions i el manteniment d'una postura correcta. Besier et al.^{97,98} observaren com es van duplicar els moments de valg/var i rotació interna/externa aplicats sobre el genoll durant els canvis de direcció inesperats en comparació a les situacions preplanificades. Aquests autors expliquen que l'execució de canvis de direcció sense una planificació adequada pot augmentar el risc de lesió de l'LEA, probablement com a conseqüència del menor temps per establir les estratègies de control neuromuscular més adequades tot intentant protegir l'articulació. En conseqüència, aquests mateixos investigadors suggereixen la necessitat d'incloure tasques que contemplin canvis de direcció inesperats en els entrenaments. En la mateixa línia, McLean et al.⁹⁹ van observar que durant els canvis de direcció en què es va incloure un oponent defensiu van augmentar els moments de força aplicats sobre el genoll en ambdós sexes. Aquest últim treball ens ha de fer reflexionar sobre la necessitat d'incloure tasques amb estímuls inesperats i d'oposició a la programació de l'entrenament dels anomenats esports de situació.

Conclusions i aplicacions pràctiques

La bibliografia científica actual descriu diferents factors de risc de lesió relacionats amb el control del sistema neuromuscular. Entre aquests destaquen la fatiga muscular, l'alteració de la magnitud i dels temps d'activació muscular, l'alteració de la capacitat de coactivació muscular, l'estratègia de control de l'extremitat inferior predominant en el pla frontal, els desequilibris neuromusculars entre la cama dominant i la no dominant, la rigidesa mus-

cular inadequada, els déficits en el control postural, la disminució de la propiocepció, els déficits de *core* i la disminució en els mecanismes d'anticipació.

L'anàlisi d'aquests factors de risc proporciona una guia pràctica a l'hora de dissenyar tasques en un pla de prevenció adequat a cada tipus d'especialitat esportiva, i pot ser útil tant per a entrenadors i preparadors físics com per a fisioterapeutes.

Actualment sabem que els factors de risc neuromuscular són modificables mitjançant l'entrenament. Malgrat que els mètodes òptims d'entrenament per a cada grup de població encara no han estat establerts, hi ha evidències sobre l'èxit d'aquest tipus d'intervencions en la prevenció, el tractament i la tornada a la competició esportiva de determinats tipus de lesions de l'extremitat inferior. Com a premissa per progressar en la dificultat i en la intensitat dels exercicis que inclouen aquest tipus d'entrenament hauríem de posar èmfasi en la biomecànica correcta de l'extremitat inferior, tot evitant o disminuint les altes càrregues a les quals es veuen sotmeses les articulacions durant les diferents activitats esportives. Per poder aconseguir aquest objectiu és molt important tenir la capacitat de dissenyar tasques adequades en cada cas, analitzant-ne l'execució amb els esportistes i donant-ne les indicacions adequades en tot moment. Podem considerar aquesta premissa com la base per poder aconseguir adaptacions positives amb la intenció de millorar el control neuromuscular.

Finalment, cal destacar la importància de la valoració mitjançant instruments vàlids i fiables amb l'objectiu d'identificar els diferents factors de risc neuromuscular citats en aquesta revisió.

Conflicte d'interessos

Els autors declaren que no tenen cap conflicte d'interessos.

Bibliografia

- Hewett TE, Paterno MV, Myer GD. Strategies for enhancing proprioception and neuromuscular control of the knee. *Clin Orthop Relat Res.* 2002;402:76-94.
- Lephart SM, Fu FH. *Proprioception and Neuromuscular Control in Joint Stability.* Champaign, IL: Human Kinetics; 2000.
- Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system. Part I. The physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train.* 2002;37:71-9.
- Eils E, Rosenbaum D. A multi-station proprioceptive exercise program in patients with ankle instability. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1991-8.
- Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, Noyes FR. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med.* 1999;27:699-706.
- Lloyd DG. Rationale for training programs to reduce anterior cruciate ligament injuries in Australian football. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31:645-54.
- Panics G, Tallay A, Pavlik A, Berkes I. Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players. *Br J Sports Med.* 2008;42:472-6.
- Herman K, Barton C, Malliaras P, Morrissey D. The effectiveness of neuromuscular warm-up strategies, that require no additio-

- nal equipment, for preventing lower limb injuries during sports participation. A systematic review. *BMC Med.* 2012;10:75.
9. Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes. Part 2. A meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention. *Am J Sports Med.* 2006;34:490-8.
 10. Hübster M, Zech A, Pfeifer K, Hänsel F, Vogt L, Banzer W. Neuromuscular training for sports injury prevention. A systematic review. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:413-21.
 11. Solomonow M, Krogsgaard M. Sensorimotor control of knee stability. A review. *Scand J Med Sci Sports.* 2001;11:64-80.
 12. Fort Vanmeerhaeghe A, Romero Rodríguez D. Rol del sistema sensoriomotor en la estabilidad articular durante las actividades deportivas. *Apunts Med Esport.* 2013, en prensa.
 13. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system. Part II. The role of proprioception in motor control and functional joint stability. *J Athl Train.* 2002;37:80-4.
 14. Roberts D. Sensory Aspects of Knee Injuries. Sweden: Lund University; 2003.
 15. Fort Vanmeerhaeghe A. Valoració i entrenament del control neuromuscular per a la millora del rendiment esportiu. Barcelona: FPCEE. Blanquerna. Universitat Ramon Llull; 2010.
 16. Bahr R, Holme I. Risk factors for sports injuries – a methodological approach. *Br J Sports Med.* 2003;37:384-92.
 17. Bahr R, Krosshaug T. Understanding injury mechanisms a key component of preventing injuries in sport. *Br J Sports Med.* 2005;39:324-9.
 18. Adirim TA, Cheng TL. Overview of injuries in the young athlete. *Sports Med.* 2003;33:75-81.
 19. Myklebust G, Bahr R. Return to play guidelines after anterior cruciate ligament surgery. *Br J Sports Med.* 2005;39:127-31.
 20. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, Bahr R, Beynon BD, Demaio M, et al. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries. A review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *Am J Sports Med.* 2006;34:1512-32.
 21. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, Samitier G, Romero D, Lázaro-Haro C, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1. Mechanisms of injury and underlying risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17:705-29.
 22. Ericksen H, Gribble PA. Sex differences, hormone fluctuations, ankle stability, and dynamic postural control. *J Athl Train.* 2012;47:143-8.
 23. Dugan SA. Sports-related knee injuries in female athletes what gives? *Am J Phys Med Rehabil.* 2005;84:122-30.
 24. Fagan V, Delahunt E. Patellofemoral pain syndrome. A review on the associated neuromuscular deficits and current treatment options. *Br J Sports Med.* 2008;42:489-95.
 25. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes. Part 1. Mechanisms and risk factors. *Am J Sports Med.* 2006;34:299-311.
 26. Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, Skjølberg A, Olsen OE, Bahr R. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players. A prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med.* 2003;13:71-8.
 27. Hosea TM, Carey CC, Harrer MF. The gender issue epidemiology of ankle injuries in athletes who participate in basketball. *Clin Orthop Relat Res.* 2000;372:45-9.
 28. Myer GD, Chu DA, Brent JL, Hewett TE. Trunk and hip control neuromuscular training for the prevention of knee joint injury. *Clin Sports Med.* 2008;27:425-48.
 29. Hewett TE, Ford KR, Hoogenboom BJ, Myer GD. Understanding and preventing ACL injuries current biomechanical and epidemiologic considerations – Update 2010. *N Am J Sports Phys Ther.* 2010;5:234-51.
 30. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. *J Physiol.* 2008;586:11-23.
 31. Borotikar BS, Newcomer R, Koppes R, McLean SG. Combined effects of fatigue and decision making on female lower limb landing postures central and peripheral contributions to ACL injury risk. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2008;23:81-92.
 32. Chappell JD, Herman DC, Knight BS, Kirkendall DT, Garrett WE, Yu B. Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 2005;33:1022-9.
 33. Kernozek TW, Torry MR, Iwasaki M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue. *Am J Sports Med.* 2008;36:554-65.
 34. McLean SG, Fellin RE, Suedekum N, Calabrese G, Passerallo A, Joy S. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:502-14.
 35. Brazen DM, Todd MK, Ambegaonkar JP, Wunderlich R, Peterson C. The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings. *Clin J Sport Med.* 2010;20:286-92.
 36. Ortiz A, Olson S, Trudelle-Jackson E, Rosario M, Venegas HL. Landing mechanics during side hopping and crossover hopping maneuvers in noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction. *PM & R.* 2011;3:13-20.
 37. Small K, McNaughton LR, Greig M, Lohkamp M, Lovell R. Soccer fatigue, sprinting and hamstring injury risk. *Int J Sports Med.* 2009;30:573-8.
 38. Forestier N, Teasdale N, Nougier V. Alteration of the position sense at the ankle induced by muscular fatigue in humans. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34:117-22.
 39. Mohammadi F, Roozdar A. Effects of fatigue due to contraction of evertor muscles on the ankle joint position sense in male soccer players. *Am J Sports Med.* 2010;38:824-8.
 40. Menacho MO, Pereira HM, Oliveira BI, Chagas LM, Toyohara MT, Cardoso JR. The peroneus reaction time during sudden inversion test systematic review. *J Electromyogr Kinesiol.* 2010;20:559-65.
 41. Munn J, Sullivan SJ, Schneiders AG. Evidence of sensorimotor deficits in functional ankle instability. A systematic review with meta-analysis. *J Sci Med Sport.* 2010;13:2-12.
 42. Myer GD, Ford KR, Hewett TE. The effects of gender on quadriceps muscle activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk position. *J Electromyogr Kinesiol.* 2005;15:181-9.
 43. Rozzi SL, Lephart SM, Gear WS, Fu FH. Knee joint laxity and neuromuscular characteristics of male and female soccer and basketball players. *Am J Sports Med.* 1999;27:312-9.
 44. Neptune RR, Wright IC, van den Bogert AJ. The influence of orthotic devices and vastus medialis strength and timing on patello femoral loads during running. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2000;15:611-8.
 45. Cowan SM, Bennell KL, Hodges PW, Crossley KM, McConnell J. Delayed onset of electromyographic activity of vastus medialis obliquus relative to vastus lateralis in subjects with patellofemoral pain syndrome. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001;82:183-9.
 46. Cowan SM, Bennell KL, Crossley KM, Hodges PW, McConnell J. Physical therapy alters recruitment of the vasti in patellofemoral pain syndrome. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34:1879-85.
 47. Hanson AM, Padua DA, Troy BJ, Prentice WE, Hirth CJ. Muscle activation during side-step cutting maneuvers in male and female soccer athletes. *J Athl Train.* 2008;43:133-43.
 48. Zazulak BT, Ponce PL, Straub SJ, Medvecky MJ, Avedisian L, Hewett TE. Gender comparison of hip muscle activity during single-leg landing. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2005;35:292-9.
 49. Prins MR, van der Wurff P. Females with patellofemoral pain syndrome have weak hip muscles a systematic review. *Aust J Physiother.* 2009;55:9-15.
 50. Lephart SM, Ferris CM, Riemann BL, Myers JB, Fu FH. Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clin Orthop Relat Res.* 2002;401:162-9.

51. Fredericson M, Cookingham CL, Chaudhari AM, Dowdell BC, Oestreicher N, Sahrmann SA. Hip abductor weakness in distance runners with iliotibial band syndrome. *Clin J Sport Med*. 2000;10:169-75.
52. Imwalle LE, Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Relationship between hip and knee kinematics in athletic women during cutting maneuvers. A possible link to noncontact anterior cruciate ligament injury and prevention. *J Strength Cond Res*. 2009;23:2223-30.
53. Jacobs CA, Uhl TL, Mattacola CG, Shapiro R, Rayens WS. Hip abductor function and lower extremity landing kinematics sex differences. *J Athl Train*. 2007;42:76-83.
54. Leetun DT, Ireland ML, Willson JD, Ballantyne BT, Davis IM. Core stability measures as risk factors for lower extremity injury in athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36:926-34.
55. Borghuis J, Hof AL, Lemmink KA. The importance of sensorimotor control in providing core stability implications for measurement and training. *Sports Med*. 2008;38:893-916.
56. Kibler WB, Press J, Sciascia A. The role of core stability in athletic function. *Sports Med*. 2006;36:189-98.
57. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk. A prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med*. 2007;35:1123-30.
58. Akuthota V, Nadler SF. Core strengthening. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85 Suppl 1:S86-92.
59. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt Jr RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med*. 2005;33:492-501.
60. Ford KR, van den Bogert J, Myer GD, Shapiro R, Hewett TE. The effects of age and skill level on knee musculature co-contraction during functional activities: A systematic review. *Br J Sports Med*. 2008;42:561-6.
61. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD, Ford KR. A review of electromyographic activation levels, timing differences, and increased anterior cruciate ligament injury incidence in female athletes. *Br J Sports Med*. 2005;39:347-50.
62. Lloyd DG, Buchanan TS, Besier TF. Neuromuscular biomechanical modeling to understand knee ligament loading. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:1939-47.
63. McLean SG, Walker KB, van den Bogert AJ. Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes an integrated analysis of three sports movements. *J Sci Med Sport*. 2005;8:411-22.
64. Ross S, Guskiewicz K, Schneider PW, Yu RB. Comparison of biomechanical factors between the kicking and stance limbs. *J Sport Rehabil*. 2004;13:135-50.
65. Wikstrom EA, Tillman MD, Kline KJ, Borsa PA. Gender and limb differences in dynamic postural stability during landing. *Clin J Sport Med*. 2006;16:311-5.
66. Nyland J, Smith S, Beickman K, Armsey T, Caborn DN. Frontal plane knee angle affects dynamic postural control strategy during unilateral stance. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1150-7.
67. Ford KR, Myer GD, Toms HE, Hewett TE. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:124-9.
68. Ireland ML, Willson JD, Ballantyne BT, Davis IM. Hip strength in females with and without patellofemoral pain. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2003;33:671-6.
69. Myer GD, Brent JL, Ford KR, Hewett TE. Real-time assessment and neuromuscular training feedback techniques to prevent ACL injury in female athletes. *Strength Cond J*. 2011;33:21-35.
70. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med*. 2010;38:1968-78.
71. Ross SE, Guskiewicz KM. Examination of static and dynamic postural stability in individuals with functionally stable and unstable ankles. *Clin J Sport Med*. 2004;14:332-8.
72. Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, Noyes FR. Plyometric training in female athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med*. 1996;24:765-73.
73. Fort A, Romero D, Costa L, Bagur C, Lloret M, Montañaola A. Diferències de l'estabilitat postural estàtica i dinàmica segons gènere i cama dominant. *Apunts Med Esport*. 2009;44:74-81.
74. Enoka RM. *Neuromechanical Basis of Kinesiology*. Champaign, IL: Human Kinetics; 1994.
75. Granata KP, Wilson SE, Padua DA. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part I. Quantification in controlled measurements of knee joint dynamics. *J Electromyogr Kinesiol*. 2002;12:119-26.
76. Granata KP, Padua DA, Wilson SE. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *J Electromyogr Kinesiol*. 2002;12:127-35.
77. Wojtys EM, Ashton-Miller JA, Huston LJ. A gender-related difference in the contribution of the knee musculature to sagittal-plane shear stiffness in subjects with similar knee laxity. *J Bone Joint Surg Am*. 2002;84-A:10-6.
78. Wojtys EM, Huston LJ, Schock HJ, Boylan JP, Ashton-Miller JA. Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85-A:782-9.
79. Padua DA, Carcia CR, Arnold BL, Granata KP. Gender differences in leg stiffness and stiffness recruitment strategy during two-legged hopping. *J Mot Behav*. 2005;37:111-25.
80. Decoster LC, Bernier JN, Lindsay RH, Vailas JC. Generalized joint hypermobility and its relationship to injury patterns among NCAA lacrosse players. *J Athl Train*. 1999;34:99-105.
81. Karageanes SJ, Blackburn K, Vangelos ZA. The association of the menstrual cycle with the laxity of the anterior cruciate ligament in adolescent female athletes. *Clin J Sport Med*. 2000;10:162-8.
82. Bernier JN, Perrin DH, Rijke A. Effect of unilateral functional instability of the ankle on postural sway and inversion and eversion strength. *J Athl Train*. 1997;32:226-32.
83. Isakov E, Mizrahi J. Is balance impaired by recurrent sprained ankle? *Br J Sports Med*. 1997;31:65-7.
84. McKeon PO, Hertel J. Systematic review of postural control and lateral ankle instability. Part I. Can deficits be detected with instrumented testing. *J Athl Train*. 2008;43:293-304.
85. Ageberg E. Postural control in single-limb stance. In individuals with anterior cruciate ligament injury and uninjured controls. Department of Physical Therapy, Lund University; 2003.
86. Friden T, Zatterstrom R, Lindstrand A, Moritz U. A stabilometric technique for evaluation of lower limb instabilities. *Am J Sports Med*. 1989;17:118-22.
87. Matsusaka N, Yokoyama S, Tsurusaki T, Inokuchi S, Okita M. Effect of ankle disk training combined with tactile stimulation to the leg and foot on functional instability of the ankle. *Am J Sports Med*. 2001;29:25-30.
88. Tropp H, Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *J Orthop Res*. 1988;6:833-9.
89. Freeman MA, Dean MR, Hanham IW. The etiology and prevention of functional instability of the foot. *J Bone Joint Surg Br*. 1965;47:678-85.
90. Lysholm M, Ledin T, Odkvist LM, Good L. Postural control—a comparison between patients with chronic anterior cruciate ligament insufficiency and healthy individuals. *Scand J Med Sci Sports*. 1998;8:432-8.

91. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J. Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury. *Med Sci Sports Exerc.* 1984;16:64-6.
92. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J. Factors affecting stabilometry recordings of single limb stance. *Am J Sports Med.* 1984;12:185-8.
93. Olmsted LC, Carcia CR, Hertel J, Shultz SJ. Efficacy of the Star Excursion Balance Tests in detecting reach deficits in subjects with chronic ankle instability. *J Athl Train.* 2002; 37:501-6.
94. McGuine TA, Greene JJ, Best T, Levenson G. Balance as a predictor of ankle injuries in high school basketball players. *Clin J Sport Med.* 2000;10:239-44.
95. Plisky PJ, Rauh MJ, Kaminski TW, Underwood FB. Star Excursion Balance Test as a predictor of lower extremity injury in high school basketball players. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2006;36:911-9.
96. Roberts D, Ageberg E, Andersson G, Friden T. Clinical measurements of proprioception, muscle strength and laxity in relation to function in the ACL-injured knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007;15:9-316.
97. Besier TF, Lloyd DG, Ackland TR, Cochrane JL. Anticipatory effects on knee joint loading during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1176-81.
98. Besier TF, Lloyd DG, Ackland TR. Muscle activation strategies at the knee during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35:119-27.
99. McLean SG, Lipfert SW, van den Bogert AJ. Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36:1008-16.