PubliCE, (PubliCE) 2021

Article

Biomecánica de la Carrera en Adolescentes: Implicaciones para la Prevención y Rehabilitación de Lesiones

Simon C. McSweeney[1], Karin Grävare Silbernagel[3], Allison H. Gruber[3], Bryan C. Heiderscheit[4], Brian J. Krabak[5], Mitchell J. Rauh[6], Adam S. Tenforde[7], Scott C. Wearing[1], Astrid Zech[8] y Karsten Hollander[9]

[1]*School of Clinical Sciences, Faculty of Health, Queensland University of Technology, Brisbane, QLD, Australia*
[2]*Department of Physical Therapy University of Delaware, Newark, NJ, United States*
[3]*Department of Kinesiology, School of Public Health – Bloomington, Indiana University, Bloomington, IN, United States*
[4]*Department of Orthopedics and Rehabilitation, University of Wisconsin, Madison, WI, United States*
[5]*Department of Rehabilitation, Orthopedics and Sports Medicine, University of Washington and Seattle Childrens Hospital, Seattle, WA, United States*
[6]*Doctor of Physical Therapy Program, San Diego State University, San Diego, CA, United States*
[7]*Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Harvard Medical School, Spaulding Rehabilitation Hospital, Boston, MA, United States*
[8]*Department of Human Movement Science and Exercise Physiology, Institute of Sport Science, Friedrich Schiller University Jena, Jena, Germany*
[9]*Institute of Interdisciplinary Exercise Science and Sports Medicine, Faculty of Medicine, MSH Medical School Hamburg, Hamburg, Germany*

RESUMEN

La participación mundial en el running sigue aumentando, especialmente entre los adolescentes. En consecuencia, está aumentando el número de lesiones relacionadas con la carrera (RRI) en los adolescentes. La evidencia emergente ahora sugiere que las lesiones por sobreuso que involucran hueso en crecimiento (por ejemplo, lesiones por estrés óseo) y tejidos blandos (por ejemplo, tendinopatías) predominan en los adolescentes que participan en deportes relacionados con la carrera. Las asociaciones entre la biomecánica de carrera y las lesiones por sobreuso se han estudiado ampliamente en adultos, sin embargo, relativamente poca investigación se ha dirigido comparativamente a la biomecánica de carrera en adolescentes. Además, la literatura disponible sobre prevención de lesiones y rehabilitación para corredores adolescentes es limitada, y existe una tendencia a generalizar la literatura para adultos a las poblaciones de adolescentes a pesar de las consideraciones pertinentes con respecto a los cambios relacionados con el crecimiento exclusivos de estos atletas. Este artículo en perspectiva ofrece comentarios y opiniones de expertos sobre el estado del conocimiento y las direcciones futuras de la investigación en la biomecánica de la carrera en adolescentes, prevención de lesiones y entrenamiento complementario.

INTRODUCCIÓN

La participación de los jóvenes en las carreras está aumentando en todo el mundo, y las tasas de participación global de los adolescentes se encuentran entre las tres principales actividades deportivas en la mayoría de las regiones (Hulteen y cols., 2017). La Organización Mundial de la Salud define a los adolescentes como personas de 10 a 19 años (Organización Mundial de la Salud, 2018). Sin embargo, la edad "biológica" o el desarrollo madurativo de los atletas adolescentes pueden ser de mayor importancia con respecto a las lesiones relacionadas con la carrera (RRI). Los cambios en tejidos como huesos, tendones, músculos, cartílagos y placa de crecimiento ocurren a velocidades y lugares variados durante los períodos de crecimiento rápido (Lloyd y cols., 2014; Krabak y cols., 2016a). La maduración de estos tejidos durante la pubertad se ve afectada por factores hormonales, genéticos y ambientales que pueden influir colectivamente en la biomecánica de la carrera, la tolerancia a la carga y RRI en corredores jóvenes (Malina, 1994; Lloyd y cols., 2014; United States track field, 2020). En particular, la especialización deportiva temprana en los atletas adolescentes se asocia con un mayor riesgo de lesiones relacionadas con el deporte, atribuido en parte a la homogeneidad de los patrones de movimiento que estresan repetidamente los mismos tejidos inmaduros (Hamill y cols., 2012; Post y cols., 2017). Aunque las asociaciones entre la biomecánica de la carrera y las lesiones por sobreuso se han estudiado ampliamente en adultos (Ceyssens y cols., 2019; Hollander y cols., 2021a), comparativamente poca investigación se ha centrado en las posibles relaciones entre las lesiones musculoesqueléticas y los cambios relacionados con el crecimiento en la edad biológica, antropometría corporal, control neuromuscular y biomecánica de la carrera en la juventud (Krabak y cols., 2020). El objetivo de este artículo en perspectiva es proporcionar un breve resumen de la epidemiología y etiología actual de la RRI. Se presta especial atención a la transición de las características fisiológicas (como el contenido mineral óseo) que se produce alrededor de la pubertad. Posteriormente, discutimos cómo el crecimiento, la maduración y el sexo pueden influir en la biomecánica de la carrera, la carga tisular y el riesgo de RRI en los atletas adolescentes.

Epidemiología y etiología de las lesiones relacionadas con la carrera en adolescentes

El crecimiento en la participación en carreras de jóvenes ha visto un aumento paralelo en la incidencia de la RRI en adolescentes (Mehl y cols., 2011). Estudios prospectivos de corredores de cross-country de la escuela secundaria han informado una amplia gama en la incidencia estacional acumulada de RRI para niñas (34% a 47%, correspondiente a 16.7 a 19.6 por 1000 exposiciones deportivas [AEs]) y niños (26% a 48 %, correspondiente a 0.9 a 15.0 por 1000 AEs) (Beachy y cols., 1997; Rauh y cols., 2000, 2006). Los lugares corporales más comúnmente lesionados para los corredores de cross-country de la escuela secundaria para ambos sexos son la canilla y la rodilla (Rauh y cols., 2000, 2006). Entre los corredores de cross-country de la escuela secundaria, la incidencia de lesiones por RRI se ha observado en 10.,9 por 1000 AEs y 8.0 por 1000 AEs para niñas y niños, respectivamente (Beachy y Rauh, 2014). Un estudio transversal en el que participaron 2113 corredores de secundaria (edad promedio de 13.2 años) encontró que las RRIs autoinformadas eran más prevalentes en niñas que en niños (56% vs 50%, $p = 0.007$) (Wu y cols., 2021). Las niñas informaron más esguinces de tobillo, dolor fémororrotuliano y calambres en las canillas que los niños, mientras que los niños informaron con más frecuencia fascitis plantar, síndrome de la banda iliotibial y enfermedad de Osgood-Schlatter (Wu y cols., 2021) que las niñas. Un informe separado en esta cohorte identificó que la lesión por estrés óseo (BSI) fue más común en niñas que en niños (6.7% vs 3.8%, $p = 0,004$), siendo la tibia, el metatarso y el peroné las ubicaciones anatómicas más comunes de lesión (Tenforde y cols., 2021).

Comprender la etiología, el tratamiento y la prevención de la RRI requiere identificar los factores de riesgo intrínsecos y extrínsecos asociados (Meeuwisse, 1994; Bahr y Holme, 2003; Rauh y cols., 2011). Una declaración de consenso reciente sobre corredores jóvenes proporcionó una evaluación integral de los factores de riesgo y sus relaciones con las lesiones musculoesqueléticas a partir de estudios de cohorte prospectivos y retrospectivos (Krabak y cols., 2020). La lesión previa (Rauh y cols., 2000, 2006; Plisky y cols., 2007; Reinking y cols., 2010; Tenforde y cols., 2013; Tirabassi y cols., 2016) y el sexo (femenino) han sido los más consistentes factores de riesgo intrínsecos para la RRI entre corredores adolescentes (Rauh y cols., 2000, 2006; Plisky y cols., 2007; Tenforde y cols., 2013; Tirabassi y cols., 2016; Hollander y cols., 2021b). Otros factores de riesgo intrínsecos que se examinan con frecuencia y que se relacionan significativamente con la RRI incluyen debilidad muscular (abductor de la cadera, extensores y flexores de rodilla) (Luedke y cols., 2015), ángulo $Q \geq 20$ grados (Rauh y cols., 2007), aumento del ROM de la rotación interna de la cadera (Yagi y cols., 2013) y desigualdad en la longitud de las piernas superior a 1.5 cm (Rauh, 2018). En corredoras adolescentes, la disfunción menstrual (Barrack y cols., 2014; Rauh y cols., 2014) y la baja densidad mineral ósea (Barrack y cols., 2014; Rauh y cols., 2014) se han asociado significativamente con la RRI y son los factores de riesgo mejor establecidos para la BSI. Además, se ha demostrado que el riesgo de la BSI está relacionado con el número de factores de riesgo acumulados (Tenforde y cols., 2013; Barrack y cols., 2014).

Hasta la fecha, se han identificado varios factores de riesgo extrínsecos que contribuyen a la RRI en los corredores de cross-country de la escuela secundaria. Estos incluyen una velocidad de paso baja (Luedke y cols., 2016), mayor

kilometraje semanal (Tenforde y cols., 2011) y, con poca frecuencia, alternancia de kilometraje de entrenamiento corto y largo o correr predominantemente en colinas durante los meses de verano (Rauh, 2014). Si bien un estudio reciente indicó que las corredoras de cross-country de la escuela secundaria que fueron clasificadas como altas especializadas en deportes, tenían un riesgo dos veces mayor de RRI musculoesquelética que las corredoras de escuelas secundarias clasificadas como bajas especializadas en deportes (Rauh y cols., 2018), García y cols. no encontraron asociación entre la especialización deportiva y la RRI entre corredores de cross-country masculinos y femeninos de secundaria y preparatoria (García y cols., 2021). Las diferencias pueden deberse en parte a diferentes diseños de estudio, muestra de corredores y definiciones de lesiones (Rauh y cols., 2018; García y cols., 2021).

BIOMECÁNICA DE LA CARRERA ADOLESCENTE

Cinética y Variables Témporoespaciales

En general, se asume que la cinética y la métrica témporoespacial de los adolescentes durante la carrera son en gran medida similares a las de los corredores adultos cuando se eliminan los efectos de la altura y la masa corporal. Esta afirmación, sin embargo, no ha sido probada debido a los estudios limitados que describen estas métricas en corredores adolescentes.

A medida que aumenta la edad, la longitud del paso durante la carrera aumenta mientras que la velocidad del paso disminuye (Schepens y cols., 1998). El aumento de la longitud del paso se atribuye al aumento de la longitud de la pierna asociado con la edad (Schepens y cols., 1998), ya que una longitud de pierna más larga se ha asociado con una menor frecuencia de pasos habituales en corredores adultos (Tenforde y cols., 2019). Antes de los 12 años, la disminución en la velocidad de paso se asocia con una disminución en la rigidez vertical total del cuerpo específica de la masa (relación de la fuerza de reacción vertical del suelo y el desplazamiento vertical del centro de masa) debido a un aumento en la masa corporal con una rigidez constante (Schepens y cols., 1998). Sin embargo, de 12 a 18 años de edad, la rigidez vertical y la velocidad de paso son aproximadamente constantes debido a un aumento paralelo tanto de la rigidez como de la masa con la edad (Schepens y cols., 1998).

A medida que aumenta la velocidad de carrera, no es sorprendente que tanto la velocidad de paso como la longitud aumenten, independientemente de la edad. Es de destacar que, a pesar de que la velocidad máxima de carrera aumenta con la edad adolescente, las contribuciones relativas de la velocidad de paso y la longitud del paso a la velocidad máxima cambian con la edad o, más precisamente, con la madurez. En aquellos que aún no alcanzaron la velocidad máxima de altura (un indicador de la madurez esquelética), la velocidad máxima de carrera se predijo mejor por la velocidad de paso, mientras que la longitud del paso fue el factor clave en esas velocidades de altura post pico (Meyers y cols., 2017). En los adolescentes cerca y por encima de la velocidad máxima de altura, la velocidad de paso y la fuerza de propulsión horizontal durante la carrera a velocidad máxima permanecen relativamente constantes a lo largo de la edad (Schepens y cols., 1998; Rumpf y cols., 2015). Además, una mayor fuerza máxima de reacción vertical del suelo durante la carrera a máxima velocidad es evidente en adolescentes mayores que en adolescentes más jóvenes, incluso cuando se tiene en cuenta el aumento de la masa corporal (Rumpf y cols., 2015). Las medidas cinéticas y témporoespaciales comúnmente descritas en corredores adultos, como la fuerza de frenado horizontal, la tasa de carga vertical y la amplitud del paso, no se han caracterizado en corredores de fondo adolescentes.

Mecánica y cinemática de las pisadas

La mayoría de los adolescentes calzados habitualmente hacen contacto inicial con un golpe con el retropié [es decir, contacto inicial con el talón (Hoenig y cols., 2020)] cuando corren a velocidades más lentas (Hollander y cols., 2018; Latorre Roman y cols., 2019). Sin embargo, la prevalencia de los patrones de golpe del retropié depende de la velocidad de carrera, el uso y la habituación al calzado, la edad y el sexo (Hollander y cols., 2018). Los patrones de golpe sin retropié [es decir, hacer contacto inicial con los dedos o la parte media del pie (Hoenig y cols., 2020)] se han sostenido como una posible estrategia de prevención de lesiones en adolescentes y adultos (Lieberman y cols., 2010), aunque la evidencia es contradictoria, especialmente para los corredores jóvenes (Warr y cols., 2015; Davis y cols., 2017; Chan y cols., 2018; Messier y cols., 2018; Anderson y cols., 2019; Krabak y cols., 2020).

Si bien la disminución de la tasa de carga es un beneficio discutible de un patrón de contacto sin el retropié (Lieberman y cols., 2010; Davis y cols., 2016), no se requiere un contacto sin el retropié para lograr tasas de carga bajas (Stiffler-Joachim et al. ., 2019) y la evidencia que asocia altas tasas de carga al desarrollo de RRI en adultos es contradictoria (Zadpoor y Nikooyan, 2011; Bredeweg y cols., 2013; Kuhman y cols., 2016; Davis y cols., 2017; Dudley et al. , 2017; Messier y cols., 2018). Además, los resultados de varios estudios señalan que el beneficio biomecánico de patrones

específicos de pisada es contradictorio (Stearne y cols., 2014; Davis y cols., 2016; Dudley y cols., 2017), lo que ha sido respaldado por estudios prospectivos recientes sobre lesiones en adultos (Warr y cols., 2015; Kuhman y cols., 2016; Messier y cols., 2018; Anderson y cols., 2019). Otra evidencia de estudios en corredores adultos sugiere que la pisada afecta más probablemente al riesgo de lesiones específicas, en lugar de que un patrón de pisada sea más o menos dañino que otro (Hollander y cols., 2021a). Se justifica una investigación adicional que abarque el efecto del patrón de las pisadas en la marcha de la carrera de los adolescentes en relación con las lesiones.

IMPLICACIONES PARA LA PREVENCIÓN DE LESIONES RELACIONADAS CON LA CARRERA

Contenido mineral óseo y hueso

La acumulación máxima de masa ósea se logra en la edad adulta temprana y está influenciada por factores estresantes biomecánicos en los huesos junto con otras características de salud (es decir, dieta, peso corporal y tejido magro y función hormonal). Una revisión de la influencia de la participación deportiva sobre la densidad y la fuerza ósea sugiere que correr es menos osteogénico que los deportes que involucran fuerzas de reacción del suelo más altas en cargas multidireccionales, como el fútbol y el baloncesto (Tenforde y Fredericson, 2011). La participación en deportes de pelota durante dos o más años antes de la pubertad puede promover un mayor contenido óseo y huesos más rígidos y resistentes a las fracturas (Milgrom y cols., 2000) y reducir el riesgo futuro de BSI en la adolescencia y la edad adulta (Fredericson y cols., 2005; Tenforde y cols., 2013, 2021).

Las adaptaciones óseas adecuadas de acuerdo con la biomecánica de carga requieren una nutrición, un sueño y una función hormonal adecuados. La tríada de la atleta femenina y la deficiencia energética relativa en el deporte (De Souza y cols., 2014; Mountjoy y cols., 2018; Tenforde y cols., 2020) describen las consecuencias de la baja disponibilidad de energía (definida como ingesta calórica inadecuada vs gasto energético del ejercicio) sobre la densidad ósea y la función hormonal (incluida la disfunción menstrual). Las necesidades calóricas pueden ser significativamente mayores durante el crecimiento y para satisfacer las demandas del deporte de carrera (Krabak y cols., 2020). Además de promover la disponibilidad de energía adecuada, asegurar el calcio apropiado de los alimentos y la suplementación con vitamina D puede promover ganancias óseas y reducir el riesgo de BSI (Kelsey y cols., 2007; Sonneville y cols., 2012; Barrack y cols., 2017). Si bien no se ha estudiado adecuadamente en corredores adolescentes, el sueño es fundamental para promover el crecimiento y reducir el riesgo de lesiones y debe considerarse debidamente en investigaciones futuras específicas para este grupo etario (Copenhaver y Diamond, 2017).

Músculo

La fuerza de los músculos de las extremidades inferiores generalmente se considera un componente importante de los programas de prevención de lesiones RRI. La razón fundamental es que la debilidad muscular conduce a una mecánica de carrera alterada y una tolerancia reducida a la carga, lo que aumenta el riesgo de lesiones comunes en las articulaciones y los tejidos blandos. Sin embargo, no se ha demostrado de manera consistente que la debilidad de los músculos de las extremidades inferiores contribuya a las lesiones en el corredor joven, similar a los hallazgos que involucran a corredores adultos (Thijs y cols., 2011; Mucha y cols., 2017). Los hallazgos de un estudio prospectivo sobre un mayor riesgo de lesiones entre los corredores de secundaria con abductores de cadera, extensores de rodilla y flexores de rodilla débiles, Luedke et al. (2015) contrasta con otro estudio que sugiere que el aumento de la fuerza del abductor de la cadera y la relación entre la fuerza de la abducción y la aducción de la cadera aumenta el riesgo de lesión (Finnoff y cols., 2011). A pesar de esta incertidumbre con respecto a la debilidad muscular y el riesgo de lesiones, los programas de prevención de lesiones con elementos de entrenamiento neuromuscular de alta intensidad, saltos, pliometría y entrenamiento del equilibrio han tenido éxito en la reducción de lesiones deportivas en atletas jóvenes (por ej., baloncesto, fútbol, fútbol americano, vóleibol) (Emery y cols., 2005; Rössler y cols., 2014; Richmond y cols., 2016). Estos estudios no se han realizado en corredores jóvenes, por lo que se desconoce la eficacia de estos programas. Entre los corredores adultos, los programas de prevención que priorizan el entrenamiento de la fuerza general de las extremidades inferiores no han reducido la incidencia de lesiones (Toresdahl y cols., 2020), aunque un programa enfocado en el fortalecimiento de los músculos del pie condujo a una tasa de lesiones 2.4 veces menor (Taddei y cols., 2020).

Tendón

Los tendones transfieren la carga entre el músculo y el hueso, son importantes para un movimiento eficiente y proporcionan un amortiguamiento mecánico para proteger el músculo (Roberts y Azizi, 2010; Konow y cols., 2012). Al correr, los tendones de alto estrés, como el tendón de Aquiles, almacenan y liberan energía con cada paso como un resorte.

Cuanto mejor funcione el tendón de Aquiles en esta tarea, mejor será la economía de carrera (Alexander, 1990). Las dimensiones de los tendones suelen estar estrechamente acopladas a las del músculo correspondiente y están optimizadas para una contracción y un movimiento muscular eficientes (Ker y cols., 1988; Alexander, 2002). Tanto el tendón como el músculo responden a la sobrecarga mecánica volviéndose más grandes y fuertes (Kubo y cols., 2001; Lambertz y cols., 2003). En la juventud, los fascículos musculares y el tendón se alargan proporcionalmente durante la maduración, al igual que el área transversal del tendón y el área transversal fisiológica del músculo (O'Brien y cols., 2010).

Sin embargo, el curso temporal de la adaptación puede ser muy diferente (Mersmann y cols., 2017), ya que un estudio informó un retraso de 1 a 2 meses en la respuesta de las propiedades del tendón al entrenamiento de la fuerza en adultos sanos (Kubo y cols., 2010). La preocupación durante la adolescencia es que parece haber un desequilibrio aún mayor en el curso temporal del crecimiento entre las propiedades de los tendones y los músculos (Mersmann y cols., 2017). Los tendones portadores de sobrecarga responden a la carga mejorando sus propiedades materiales (es decir, módulo elástico; resistencia a la tracción) en la adolescencia temprana, con hipertrofia (es decir, cambio de área transversal) que ocurre en las últimas etapas de la adolescencia (Waugh y cols., 2012; Mogi, 2020). El músculo, por otro lado, se desarrolla progresivamente durante la adolescencia y este retraso teórico en la adaptación del tendón, especialmente en el tamaño, puede ser la razón de la aparición de tendinopatías por pos sobreuso en deportistas jóvenes. También hay un desajuste en la tasa de crecimiento de la unidad músculo-tendinosa en relación con la del hueso durante la pubertad, en la que los cambios en el brazo de momento del tendón no siempre son proporcionales a los cambios en el músculo y la longitud del brazo de momento externo, lo que puede conducir a un aumento de la carga sobre el tendón al correr (O'Brien, 2016). Otra preocupación es que el tejido del tendón también responde a diferentes tipos de estímulos que el músculo. Si bien las actividades pliométricas, como correr y saltar, pueden mejorar la fuerza muscular, la pliometría no parece ser efectiva para mejorar la rigidez de los tendones en los adultos (Bohm y cols., 2014). El tendón, por otro lado, parece responder preferentemente a ejercicios de entrenamiento de la fuerza con cargas elevadas que tensan los tendones durante más tiempo que las actividades balísticas (Arampatzis y cols., 2010). Si un corredor joven no realiza ningún otro tipo de actividad, como el entrenamiento de la fuerza, es posible que el tendón no reciba el estímulo adecuado para agrandarse y fortalecerse y, en cambio, existe un mayor riesgo de desarrollar tendinopatías.

La carga excesiva de los tendones se considera un factor de riesgo de tendinopatía (Millar y cols., 2021). Para abordar la sobrecarga de los tendones durante la carrera, uno tendría que (1) disminuir la carga mediante el entrenamiento o modificaciones técnicas, o (2) mejorar la resistencia del tendón a la carga (es decir, la rigidez). En comparación con los adultos, los niños desarrollan niveles más bajos de fuerza muscular a ritmos más lentos (Asai y Aoki, 1996; Grosset y cols., 2005; Falk y cols., 2009; Gillen y cols., 2019). La implementación de un programa de entrenamiento de la fuerza para corredores jóvenes abordaría esta debilidad muscular relativa y también mejoraría la rigidez del tendón y, al hacerlo, mejoraría la tasa de producción de fuerza de la unidad músculo-tendinosa (Waugh y cols., 2014). Ésta es un área creciente de investigación en los niños.

Aspectos sensoriomotrices de la carrera en adolescentes

La mayor vulnerabilidad a las lesiones del pie y del tobillo de los niños de entre 10 y 14 años (Lambers y cols., 2012; Doherty y cols., 2014) está ampliamente relacionada con las desafiantes fases en el desarrollo del control motor debido a las características fisiológicas que cambian rápidamente (por ejemplo, antropometría, hormonas) (Davies y Rose, 2000). Aunque la mayoría de los aspectos de la asociación entre el crecimiento y el control sensoriomotriz aún se desconocen, existe evidencia de que las habilidades básicas de coordinación son altamente adaptables durante la niñez y la adolescencia (Quatman-Yates y cols., 2012). Esto incluye fases de mejoras rápidas y estados estables, aunque algunos individuos pueden mostrar disminuciones temporales en las habilidades de equilibrio durante la velocidad máxima de la altura (Davies y Rose, 2000; John y cols., 2019b; Schedler y cols., 2019). Un indicador del desarrollo del control sensoriomotriz en la marcha es la disminución prolongada de la variabilidad del paso a paso, que es excepcionalmente alta durante los primeros años de la infancia y disminuye constantemente hasta la adolescencia (Hausdorff y cols., 1999; Petersen et al. ., 2010; Kraan y cols., 2017). Una alta adaptabilidad del sistema sensoriomotriz al equilibrio de las extremidades inferiores, la fuerza, la potencia y la estabilidad postural (y la biomecánica de la carrera asociada) en la adolescencia se muestra en estudios que utilizan la intervención del entrenamiento neuromuscular (Faude y cols., 2017; Hopper y cols., 2017).

Una indicación de que el desarrollo del control sensoriomotriz durante la infancia puede depender de los hábitos del calzado es proporcionado por John y col. (2019a). Estos investigadores demostraron que la maduración condujo a un estado estable de equilibrio en el rendimiento en niños de 11 a 14 años que usaban zapatillas deportivas y actividades recreativas. Los participantes de la misma edad que crecieron habitualmente descalzos, sin embargo, continuaron aumentando su rendimiento de equilibrio durante la adolescencia (John y cols., 2019a). Este hallazgo puede explicar los beneficios de las actividades habituales de los pies descalzos con respecto a una posible reducción del riesgo de lesiones en las extremidades inferiores en los adolescentes de Kenia (Aibast y cols., 2017). Sin embargo, la evidencia de la influencia del calzado sobre el dolor y las lesiones musculoesqueléticas es limitada (Hollander y cols., 2017; Francis y cols.,

2018). Asimismo, la evidencia sobre los efectos de las estrategias de prevención de lesiones por correr en niños o adolescentes es escasa. En corredores adultos, se informaron hallazgos inconsistentes para los efectos de diferentes propiedades del calzado para correr (plantillas, amortiguación) (Ryan y cols., 2014; Nigg y cols., 2015; Hulme y cols., 2017). Independientemente del deporte, los atletas adolescentes parecen beneficiarse de las intervenciones del entrenamiento neuromuscular no sólo para la prevención de lesiones, sino también con respecto a la biomecánica lesiva y el control sensoriomotriz (Faude y cols., 2017; Hopper y cols., 2017). Sin embargo, se necesitan investigaciones futuras para confirmar o refutar estos efectos en los atletas jóvenes que corren.

Discusión

Está claro que existe evidencia limitada sobre la influencia de la biomecánica en el riesgo de la lesión RRI durante el crecimiento y el desarrollo en corredores jóvenes. No obstante, la participación en actividades basadas en carreras tiene importantes beneficios para la salud. Correr se asocia positivamente con la mejora de las competencias de movimiento, incluidas las habilidades de estabilidad y control (Kriemler y cols., 2010; Lubans y cols., 2010; Krabak y cols., 2020). Correr también puede mejorar la aptitud cardiorrespiratoria al mismo tiempo que disminuye el riesgo de obesidad, lo que repercute en problemas a largo plazo como las enfermedades cardíacas y la diabetes (Kriemler y cols., 2010; Lubans y cols., 2010). Por lo tanto, correr representa un método fácil y efectivo para que los jóvenes cumplan con las pautas actuales de ejercicio de 60 minutos o más de actividad física por día (Bull y cols., 2020).

Desafortunadamente, no ha habido informes científicos que respalden recomendaciones de entrenamiento específicas basadas en evidencia para corredores jóvenes (Krabak y cols., 2020; Scheer y cols., 2021). Las recomendaciones publicadas con respecto a los volúmenes y distancias de entrenamiento apropiados se basan principalmente en opiniones de profesionales de la salud y entrenadores (Jenny y Armstrong, 2013; Blankson y Brenner, 2016; Finley y cols., 2017; Scheer y cols., 2021). Los programas de carrera específicos para jóvenes asociados con clubes de carreras (por ej., *Boston Athletic Association, Students Run Los Angeles*) han intentado abordar el riesgo de lesiones en estos programas de entrenamiento de carreras para jóvenes, pero se necesita más investigación (*Students run LA, 0000*; Miller y cols., 2018). A pesar de estas limitaciones, parece razonable sugerir que los jóvenes que participan en un programa de entrenamiento supervisado tienen, en teoría, más probabilidades de estar preparados física y mentalmente para eventos de carrera y tienen un riesgo potencial menor de sufrir lesiones y agotamiento que los jóvenes que no participan en programas de entrenamiento supervisados (Krabak y cols., 2020).

Con el objetivo de reducir las cargas generales relacionadas con la carrera y las específicas del tejido lesionado, el reentrenamiento de la marcha es una estrategia emergente específica de la rehabilitación para modificar la biomecánica que contribuye a la lesión en el corredor lesionado. Las consideraciones del reentrenamiento de la marcha pueden considerarse apropiadas para el corredor lesionado con síntomas que no se resuelven, luego de un período de descanso relativo y reintroducción de aumentos graduales en el volumen de entrenamiento de la carrera (Davis y Futrell, 2016; Krabak y cols., 2016b). Si se implementa correctamente, las demandas impuestas al tejido lesionado se reducen, lo que promueve la recuperación y mitiga potencialmente el riesgo de recurrencia. Si bien el entrenamiento de la fuerza aumenta la capacidad de carga del tejido, las ganancias de fuerza no suelen mejorar la biomecánica de carrera asociada con el riesgo de lesiones (Willy y Davis, 2011). Se han sugerido varios enfoques de reentrenamiento en la carrera, como aumentar la velocidad de paso o hacer la transición a un apoyo sin retropié, y los efectos biomecánicos de cada uno están bien descritos en adultos (Heiderscheit y cols., 2011; Chumanov y cols., 2012; Adams y cols., 2018; Yong y cols., 2018; Napier y cols., 2019; Zimmermann y Bakker, 2019). A pesar de los pocos ensayos clínicos, los hallazgos han sido consistentemente positivos en el sentido de que el reentrenamiento de la carrera aplicado de manera apropiada mejora los resultados informados por los pacientes y la recuperación de lesiones (Noehren y cols., 2011; Willy y cols., 2012; Helmhout y cols., 2015). Por ejemplo, aumentar la frecuencia de paso o usar un apoyo sin retropié mejoró la resolución de los síntomas y el regreso a la carrera completa en adultos con dolor fémororrotuliano (Roper y cols., 2016; Bramah y cols., 2019; Dos Santos y cols., 2019), probablemente debido a la reducción concomitante de la carga de la articulación fémororrotuliana (Lenhart y cols., 2014, 2015). Es importante destacar que el reentrenamiento en la carrera puede inducir cambios biomecánicos secundarios que deben considerarse, como un aumento en la carga del tendón de Aquiles con un apoyo sin retropié (Baggaley y cols., 2017). Como tal, la selección de un enfoque de reentrenamiento de la carrera apropiado no debe verse como una talla única para todos, sino que debe basarse en las características de la lesión del individuo, la mecánica de la carrera y los objetivos relacionados con la carrera.

Hasta la fecha, no se han informado ensayos entre corredores adolescentes que utilicen el reentrenamiento en la carrera como parte de un plan de rehabilitación de lesiones. Un ensayo reciente encontró que los corredores adolescentes sanos no modificaron su patrón de pisadas después de programas de reentrenamiento de la carrera de 10 semanas diseñados para promover una transición a una pisada sin retropié (González y cols., 2021), lo que sugiere que pueden ser necesarios enfoques únicos en esta población. No obstante, dado el mayor riesgo de dolor en la canilla en los corredores de secundaria y de BSI en los corredores universitarios que utilizan un ritmo de paso más bajo (Luedke y cols., 2016; Kliethermes y cols., 2021), el reentrenamiento en la carrera en esta población puede considerarse como parte de un plan

de tratamiento integral.

En base a la evidencia actual, se deben abordar varios factores en el corredor juvenil con el objetivo de prevenir o rehabilitar una lesión. Existe evidencia sólida que respalda las lesiones previas y el sexo (es decir, niñas) como factores de riesgo para una futura lesión RRI (Krabak y cols., 2020), y una evidencia más limitada para respaldar la disfunción menstrual y el IMC bajo para el desarrollo de fracturas por estrés (Field y cols., 2011; Tenforde y cols., 2015). Las evaluaciones centradas en la alineación anatómica, los déficits de fuerza o flexibilidad, la cinemática de la pisada, la cinética de la carrera y el control neuromuscular necesitan una investigación más sólida, pero representan oportunidades potenciales para la prevención de lesiones. Además, debe tenerse en cuenta que en los últimos años ha surgido un modelo más complejo de riesgo de lesión (Bittencourt y cols., 2016). Este modelo descrito por Bittencourt et al. (2016) ciertamente debe tenerse en cuenta para evaluar el riesgo de lesiones en corredores jóvenes, ya que estos factores no biomecánicos y biomecánicos pueden interactuar entre sí. Por lo tanto, los atletas deben ser evaluados clínicamente de manera integral para detectar los factores conocidos con intervenciones adicionales, según corresponda (Figura 1).

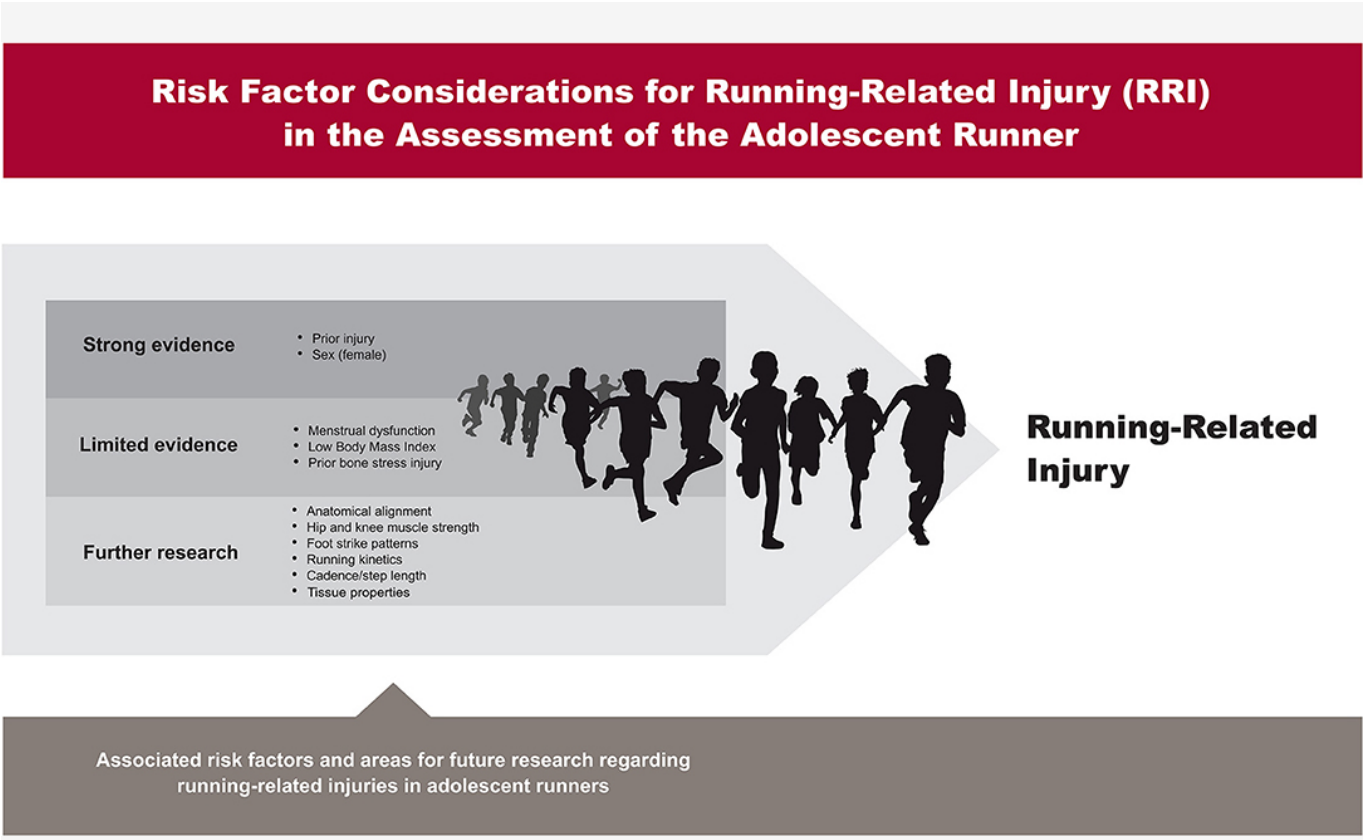

Figura 1. *Consideraciones sobre los factores de riesgo para las lesiones relacionadas con la carrera (RRI) en la evaluación del corredor adolescente.*

Este artículo en perspectiva ha proporcionado un resumen del conocimiento actual y las consideraciones futuras para la investigación de la biomecánica de la carrera en adolescentes y la prevención de lesiones. En última instancia, lo que falta son estudios longitudinales completos que controlen los cambios en la biomecánica de la carrera y el tejido musculoesquelético asociado. Dichos datos son fundamentales para el diseño eficaz de la prevención de lesiones y el regreso a los programas de carreras que no sólo fomentan un rendimiento óptimo, sino que también promueven un desarrollo musculoesquelético saludable en los adolescentes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Jim Maciukenas de la Facultad de Salud Pública de Bloomington de la Universidad de Indiana por su ayuda con el diseño gráfico de la Figura 1.

REFERENCIAS

1. Adams, D., Pozzi, F., Willy, R. W., Carrol, A., and Zeni, J. (2018). Altering cadence or vertical oscillation during running: effects on running related injury factors. *Int. J. Sports Phys. Ther. 13:633.*
2. Aibast, H., Okutoyi, P., Sigei, T., Adero, W., Chemjor, D., Ongaro, N., et al. (2017). Foot structure and function in habitually barefoot and shod adolescents in Kenya. *Curr. Sports Med. Rep. 16, 448–458.*
3. Alexander, R. (1990). Three uses for springs in legged locomotion. *Int. J. Rob. Res. 9, 53–61.*
4. Alexander, R. M. (2002). Tendon elasticity and muscle function. *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr Physiol. 133, 1001–1011.*
5. Anderson, L. M., Bonanno, D. R., Hart, H. F., and Barton, C. J. (2019). What are the benefits and risks associated with changing foot strike pattern during running? A systematic review and meta-analysis of injury, running economy, and biomechanics. *Sports Med. 50, 1–33.*
6. Arampatzis, A., Peper, A., Bierbaum, S., and Albracht, K. (2010). Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain. *J. Biomech. 43, 3073–3079.*
7. Asai, H., and Aoki, J. (1996). Force development of dynamic and static contractions in children and adults. *Int. J. Sports Med. 17, 170–174.*
8. Baggaley, M., Willy, R., and Meardon, S. (2017). Primary and secondary effects of real-time feedback to reduce vertical loading rate during running. *Scand. J. Med. Sci. Sports 27, 501–507.*
9. Bahr, R., and Holme, I. (2003). Risk factors for sports injuries—a methodological approach. *Br. J. Sports Med. 37, 384–392.*
10. Barrack, M. T., Fredericson, M., Tenforde, A. S., and Nattiv, A. (2017). Evidence of a cumulative effect for risk factors predicting low bone mass among male adolescent athletes. *Br. J. Sports Med. 51, 200–205.*
11. Barrack, M. T., Gibbs, J. C., De Souza, M. J., Williams, N. I., Nichols, J. F., Rauh, M. J., et al. (2014). Higher incidence of bone stress injuries with increasing female athlete triad–related risk factors: a prospective multisite study of exercising girls and women. *Am. J. Sports Med. 42, 949–958.*
12. Beachy, G., Akau, C. K., Martinson, M., and Olderr, T. F. (1997). High school sports injuries: a longitudinal study at Punahou School: 1988 to 1996. *Am. J. Sports Med. 25, 675–681.*
13. Beachy, G., and Rauh, M. (2014). Middle school injuries: a 20-year (1988–2008) multisport evaluation. *J. Athl. Train. 49, 493–506.*
14. Bittencourt, N. F., Meeuwisse, W., Mendonça, L., Nettel-Aguirre, A., Ocarino, J., and Fonseca, S. (2016). Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor identification to injury pattern recognition—narrative review and new concept. *Br. J. Sports Med. 50, 1309–1314.*
15. Blankson, K. L., and Brenner, J. S. (2016). Anticipatory guidance for long-distance running in young athletes. *Pediatr. Ann. 45, e83–e86.*
16. Bohm, S., Mersmann, F., Tettke, M., Kraft, M., and Arampatzis, A. (2014). Human Achilles tendon plasticity in response to cyclic strain: effect of rate and duration. *J. Exp. Biol. 217, 4010–4017.*
17. Bramah, C., Preece, S. J., Gill, N., and Herrington, L. (2019). A 10% increase in step rate improves running kinematics and clinical outcomes in runners with patellofemoral pain at 4 weeks and 3 months. *Am. J. Sports Med. 47, 3406–3413.*
18. Bredeweg, S. W., Kluitenberg, B., Bessem, B., and Buist, I. (2013). Differences in kinetic variables between injured and noninjured novice runners: a prospective cohort study. *J. Sci. Med. Sport 16, 205–210.*
19. Bull, F. C., Al-Ansari, S. S., Biddle, S., Borodulin, K., Buman, M. P., Cardon, G., et al. (2020). World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *Br. J. Sports Med. 54, 1451–1462.*
20. Ceyssens, L., Vanelderen, R., Barton, C., Malliaras, P., and Dingenen, B. (2019). Biomechanical risk factors associated with running-related injuries: a systematic review. *Sports Med. 49, 1095–1115.*
21. Chan, Z. Y., Zhang, J. H., Au, I. P., An, W. W., Shum, G. L., Ng, G. Y., et al. (2018). Gait retraining for the reduction of injury occurrence in novice distance runners: 1-year follow-up of a randomized controlled trial. *Am. J. Sports Med. 46, 388–395.*
22. Chumanov, E. S., Wille, C. M., Michalski, M. P., and Heiderscheit, B. C. (2012). Changes in muscle activation patterns when running step rate is increased. *Gait Posture 36, 231–235.*
23. Copenhaver, E. A., and Diamond, A. B. (2017). The value of sleep on athletic performance, injury, and recovery in the young athlete. *Pediatr. Ann. 46, e106–e111.*
24. Davies, P. L., and Rose, J. D. (2000). Motor skills of typically developing adolescents: awkwardness or improvement? Phys. *Occup. Ther. Pediatr. 20, 19–42.*
25. Davis, I. S., Bowser, B. J., and Mullineaux, D. R. (2016). Greater vertical impact loading in female runners with medically diagnosed injuries: a prospective investigation. *Br. J. Sports Med. 50, 887–892.*
26. Davis, I. S., and Futrell, E. (2016). Gait retraining: altering the fingerprint of gait. *Phys. Med. Rehabil. Clin. 27, 339–355.*
27. Davis, I. S., Rice, H. M., and Wearing, S. C. (2017). Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries. *J. Sport Health Sci. 6, 154–161.*
28. De Souza, M. J., Nattiv, A., Joy, E., Misra, M., Williams, N. I., Mallinson, R. J., et al. (2014). 2014 female athlete triad coalition consensus statement on treatment and return to play of the female athlete triad: 1st international conference held in San Francisco, California, May 2012 and 2nd international conference held in Indianapolis, Indiana, May 2013. *Br. J. Sports Med. 48, 289–289.*
29. Doherty, C., Delahunt, E., Caulfield, B., Hertel, J., Ryan, J., and Bleakley, C. (2014). The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies. *Sports Med. 44, 123–140.*
30. Dos Santos, A. F., Nakagawa, T. H., Lessi, G. C., Luz, B. C., Matsuo, H. T., Nakashima, G. Y., et al. (2019). Effects of three gait retraining techniques in runners with patellofemoral pain. *Phys. Ther. Sport 36, 92–100.*
31. Dudley, R. I., Pamukoff, D. N., Lynn, S. K., Kersey, R. D., and Noffal, G. J. (2017). A prospective comparison of lower extremity kinematics and kinetics between injured and non-injured collegiate cross country runners. *Hum. Mov. Sci. 52, 197–202.*

32. Emery, C. A., Cassidy, J. D., Klassen, T. P., Rosychuk, R. J., and Rowe, B. H. (2005). Effectiveness of a home-based balance-training program in reducing sports-related injuries among healthy adolescents: a cluster randomized controlled trial. *CMAJ 172, 749–754*.
33. Falk, B., Usselman, C., Dotan, R., Brunton, L., Klentrou, P., Shaw, J., et al. (2009). Child–adult differences in muscle strength and activation pattern during isometric elbow flexion and extension. *Appl. Physiol. Nutr. Metab. 34, 609–615.*
34. Faude, O., Rössler, R., Petushek, E. J., Roth, R., Zahner, L., and Donath, L. (2017). Neuromuscular adaptations to multimodal injury prevention programs in youth sports: a systematic review with meta-analysis of randomized controlled trials. *Front. Physiol. 8:791*.
35. Field, A. E., Gordon, C. M., Pierce, L. M., Ramappa, A., and Kocher, M. S. (2011). Prospective study of physical activity and risk of developing a stress fracture among preadolescent and adolescent girls. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med. 165, 723–728.*
36. Finley, P. S., Fountain, J., and Finley, D. P. (2017). Road racing and youth running: cross country coaches' perspectives. *Sport J. 19.*
37. Finnoff, J. T., Hall, M. M., Kyle, K., Krause, D. A., Lai, J., and Smith, J. (2011). Hip strength and knee pain in high school runners: a prospective study. *PM R 3, 792–801.*
38. Francis, P., Schofield, G., and Mackay, L. (2018). Being barefoot. *Prevalence at home, in school and during sport: a cross-sectional survey of 714 New Zealand secondary school boys. J. Foot. Ankle Res. 11:42.*
39. Fredericson, M., Ngo, J., and Cobb, K. (2005). Effects of ball sports on future risk of stress fracture in runners. *Clin. J. Sport Med. 15, 136–141.*
40. Garcia, M. C., Taylor-Haas, J. A., Rauh, M. J., Toland, M. D., and Bazett-Jones, D. M. (2021). Sport specialization in middle-and high-school long-distance runners. *J. Athl. Train.*
41. Gillen, Z. M., Shoemaker, M. E., McKay, B. D., Bohannon, N. A., Gibson, S. M., and Cramer, J. T. (2019). Muscle strength, size, and neuromuscular function before and during adolescence. *Eur. J. Appl. Physiol. 119, 1619–1632.*
42. González, P. J. C., García-Pinillos, F., López, D. J. M., Linares, A. J. C., Montilla, J. A. P., and Latorre-Román, P. Á. (2021). Effects of a 10-week running-retraining programme on the foot strike pattern of adolescents: a longitudinal intervention study. *Gait Posture 83, 147–151.*
43. Grosset, J.-F., Mora, I., Lambertz, D., and Perot, C. (2005). Age-related changes in twitch properties of plantar flexor muscles in prepubertal children. *Pediatr. Res. 58, 966–970.*
44. Hamill, J., Palmer, C., and Van Emmerik, R. E. (2012). Coordinative variability and overuse injury. *Sports Med. Arthrosc. Rehabil. Ther. Technol. 4, 1–9.*
45. Hausdorff, J., Zemany, L., Peng, C.-K., and Goldberger, A. (1999). Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. *J. Appl. Physiol. 86, 1040–1047.*
46. Heiderscheit, B. C., Chumanov, E. S., Michalski, M. P., Wille, C. M., and Ryan, M. B. (2011). Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Med. Sci. Sports Exerc. 43:296.*
47. Helmhout, P. H., Diebal, A. R., van der Kaaden, L., Harts, C. C., Beutler, A., and Zimmermann, W. O. (2015). The effectiveness of a 6-week intervention program aimed at modifying running style in patients with chronic exertional compartment syndrome: results from a series of case studies. *Orthop. J. Sports Med. 3:23259671155756 91.*
48. Hoenig, T., Rolvien, T., and Hollander, K. (2020). Footstrike patterns in runners: concepts, classifications, techniques, and implicationsfor running-related injuries. *Deut. Z Sportmed. 71, 55–61.*
49. Hollander, K., de Villiers, J. E., Venter, R., Sehner, S., Wegscheider, K., Braumann, K. M., et al. (2018). foot strike patterns differ between children and adolescents growing up barefoot vs. *shod. Int. J. Sports Med. 39, 97–103.*
50. Hollander, K., Heidt, C., Babette, C. V. D. Z., Braumann, K. M., and Zech, A. (2017). Long-term effects of habitual barefoot running and walking: a systematic review. *Med. Sci. Sports Exerc. 49, 752–762.*
51. Hollander, K., Johnson, C. D., Outerleys, J., and Davis, I. S. (2021a). Multifactorial determinants of running injury locations in 550 injured recreational runners. *Med. Sci. Sports Exerc. 53, 102–107.*
52. Hollander, K., Rahlf, A. L., Wilke, J., Edler, C., Steib, S., Junge, A., et al. (2021b). Sex-specific differences in running injuries: a systematic review with meta-analysis and meta-regression. *Sports Med. 51, 1011–1039.*
53. Hopper, A. J., Haff, E. E., Joyce, C., Lloyd, R. S., and Haff, G. G. (2017). Neuromuscular training improves lower extremity biomechanics associated with knee injury during landing in 11–13 year old female netball athletes: a randomized control study. *Front. Physiol. 8:883.*
54. Hulme, A., Nielsen, R. O., Timpka, T., Verhagen, E., and Finch, C. (2017). Risk and protective factors for middle-and long-distance running-related injury. *Sports Med. 47, 869–886.*
55. Hulteen, R. M., Smith, J. J., Morgan, P. J., Barnett, L. M., Hallal, P. C., Colyvas, K., et al. (2017). Global participation in sport and leisure-time physical activities: a systematic review and meta-analysis. *Prev. Med. 95, 14–25.*
56. Jenny, S., and Armstrong, T. (2013). Distance running and the Elementary-age child. *J. Phys. Edu. Recreation Dance 84, 17–25.*
57. John, C., Hollander, K., Elsabe de Villiers, J., Hamacher, D., Venter, R., and Zech, A. (2019a). The influence of biological maturity on motor performance among habitually barefoot versus habitually shod adolescents. *Eur. J. Sport Sci. 19, 621–627.*
58. John, C., Rahlf, A. L., Hamacher, D., and Zech, A. (2019b). Influence of biological maturity on static and dynamic postural control among male youth soccer players. *Gait Posture 68, 18–22.*
59. Kelsey, J. L., Bachrach, L. K., Procter-Gray, E., Nieves, J., Greendale, G. A., Sowers, M., et al. (2007). Risk factors for stress fracture among young female cross-country runners. *Med. Sci. Sports Exerc. 39, 1457–1463.*
60. Ker, R., Alexander, R. M., and Bennett, M. (1988). Why are mammalian tendons so thick? J. *Zool. 216, 309–324.*
61. Kliethermes, S. A., Stiffler-Joachim, M. R., Wille, C. M., Sanfilippo, J. L., Zavala, P., and Heiderscheit, B. C. (2021). Lower step rate is associated with a higher risk of bone stress injury: a prospective study of collegiate cross country runners. *Br. J. Sports Med. 55.*
62. Konow, N., Azizi, E., and Roberts, T. J. (2012). Muscle power attenuation by tendon during energy dissipation. *Proc. R. Soc. B, Biol. Sci. 279, 1108–1113.*

63. Kraan, C., Tan, A., and Cornish, K. (2017). The developmental dynamics of gait maturation with a focus on spatiotemporal measures. *Gait Posture 51:208–217.*
64. Krabak, B. J., Roberts, W. O., Tenforde, A. S., Ackerman, K. E., Adami, P. E., Baggish, A. L., et al. (2020). Youth running consensus statement: minimising risk of injury and illness in youth runners. *Br. J. Sports Med. 55, 305–318.*
65. Krabak, B. J., Snitily, B., and Milani, C. J. (2016a). Running injuries during adolescence and childhood. *Phys. Med. Rehabil. Clin. 27, 179–202.*
66. Krabak, B. J., Snitily, B., and Milani, C. J. (2016b). Understanding and treating running injuries in the youth athlete. *Curr. Phys. Med. Rehabil. Rep. 4, 161–169.*
67. Kriemler, S., Zahner, L., Schindler, C., Meyer, U., Hartmann, T., Hebestreit, H., et al. (2010). Effect of school based physical activity programme (KISS) on fitness and adiposity in primary schoolchildren: cluster randomised controlled trial. *BMJ 340:c785.*
68. Kubo, K., Ikebukuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., and Kanehisa, H. (2010). Time course of changes in muscle and tendon properties during strength training and detraining. *J. Strength Cond. Res. 24, 322–331.*
69. Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., and Fukanaga, T. (2001). Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *Int. J. Sports Med. 22, 138–143.*
70. Kuhman, D. J., Paquette, M. R., Peel, S. A., and Melcher, D. A. (2016). Comparison of ankle kinematics and ground reaction forces between prospectively injured and uninjured collegiate cross country runners. *Hum. Mov. Sci. 47, 9–15.*
71. Lambers, K., Ootes, D., and Ring, D. (2012). Incidence of patients with lower extremity injuries presenting to US emergency departments by anatomic region, disease category, and age. *Clin. Orthop. Relat. Res. 470, 284–290.*
72. Lambertz, D., Mora, I., Grosset, J.-F., and Pérot, C. (2003). Evaluation of musculotendinous stiffness in prepubertal children and adults, taking into account muscle activity. *J. Appl. Physiol. 95, 64–72.*
73. Latorre Roman, P. A., Redondo Balboa, F., Parraga Montilla, J., Soto Hermoso, V. M., Consuegra Gonzalez, P. J., and Garcia Pinillos, F. (2019). Analysis of foot strike pattern, rearfoot dynamic and foot rotation over childhood. *A cross-sectional study. J. Sports Sci. 37, 477–483.*
74. Lenhart, R. L., Smith, C. R., Vignos, M. F., Kaiser, J., Heiderscheit, B. C., and Thelen, D. G. (2015). Influence of step rate and quadriceps load distribution on patellofemoral cartilage contact pressures during running. *J. Biomech. 48, 2871–2878.*
75. Lenhart, R. L., Thelen, D. G., Wille, C. M., Chumanov, E. S., and Heiderscheit, B. C. (2014). Increasing running step rate reduces patellofemoral joint forces. *Med. Sci. Sports Exerc. 46:557.*
76. Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'andrea, S., Davis, I. S., et al. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature 463, 531–535.*
77. Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Faigenbaum, A. D., Myer, G. D., and Croix, M. B. D. S. (2014). Chronological age vs. *biological maturation: implications for exercise programming in youth. J. Strength Cond. Res. 28, 1454–1464.*
78. Lubans, D. R., Morgan, P. J., Cliff, D. P., Barnett, L. M., and Okely, A. D. (2010). Fundamental movement skills in children and adolescents. *Sports Med. 40, 1019–1035.*
79. Luedke, L. E., Heiderscheit, B. C., Williams, D., and Rauh, M. J. (2016). Influence of step rate on shin injury and anterior knee pain in high school runners. *Med. Sci. Sports Exerc. 48, 1244–1250.*
80. Luedke, L. E., Heiderscheit, B. C., Williams, D. B., and Rauh, M. J. (2015). Association of isometric strength of hip and knee muscles with injury risk in high school cross country runners. *Int. J. Sports Phys. Ther. 10:868.*
81. Malina, R. M. (1994). Physical growth and biological maturation of young athletes. *Exerc. Sport Sci. Rev. 22, 280–284.*
82. Meeuwisse, W. H. (1994). Assessing Causation in Sport Injury: A Multifactorial Model. *Philadelphia, PA: LWW*
83. Mehl, A. J., Nelson, N. G., and McKenzie, L. B. (2011). Running-related injuries in school-age children and adolescents treated in emergency departments from 1994 through 2007. *Clin. Pediatr. (Phila) 50, 126–132.*
84. Mersmann, F., Bohm, S., and Arampatzis, A. (2017). Imbalances in the development of muscle and tendon as risk factor for tendinopathies in youth athletes: a review of current evidence and concepts of prevention. *Front. Physiol. 8:987.*
85. Messier, S. P., Martin, D. F., Mihalko, S. L., Ip, E., DeVita, P., Cannon, D. W., et al. (2018). A 2-year prospective cohort study of overuse running injuries: the runners and injury longitudinal study (TRAILS). *Am. J. Sports Med. 46, 2211–2221.*
86. Meyers, R. W., Oliver, J. L., Hughes, M. G., Lloyd, R. S., and Cronin, J. B. (2017). Influence of age, maturity, and body size on the spatiotemporal determinants of maximal sprint speed in boys. *J. Strength Cond. Res. 31, 1009–1016.*
87. Milgrom, C., Simkin, A., Eldad, A., Nyska, M., and Finestone, A. (2000). Using bone's adaptation ability to lower the incidence of stress fractures. *Am. J. Sports Med. 28, 245–251.*
88. Millar, N. L., Silbernagel, K. G., Thorborg, K., Kirwan, P. D., Galatz, L. M., Abrams, G. D., et al. (2021). Tendinopathy. *Nat. Rev. Dis. Primers 7, 1–21.*
89. Miller, E., Goldman, J., Beck, J., Runestad, S., Serpa, R., Sangiorgio, S., et al. (2018). Is marathon training safe for adolescents? AMSSM research Podium presentations. *Clin. J. Sport Med. 28, 239–248.*
90. Mogi, Y. (2020). The effects of growth on structural properties of the Achilles and Patellar tendons: a cross-sectional study. *Physiol. Rep. 8:e14544.*
91. Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J., Burke, L., Ackerman, K. E., Blauwet, C., Constantini, N., et al. (2018). International Olympic Committee (IOC) consensus statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): 2018 update. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 28, 316–331.*
92. Mucha, M. D., Caldwell, W., Schlueter, E. L., Walters, C., and Hassen, A. (2017). Hip abductor strength and lower extremity running related injury in distance runners: a systematic review. *J. Sci. Med. Sport 20, 349–355.*
93. Napier, C., MacLean, C. L., Maurer, J., Taunton, J. E., and Hunt, M. A. (2019). Real-time biofeedback of performance to reduce braking forces associated with running-related injury: An exploratory study. *J. Orthop. Sports Phys. Ther. 49, 136–144.*
94. Nigg, B. M., Baltich, J., Hoerzer, S., and Enders, H. (2015). Running shoes and running injuries: mythbusting and a proposal for two new paradigms:'preferred movement path'and 'comfort filter'. *Br. J. Sports Med. 49, 1290–1294.*
95. Noehren, B., Scholz, J., and Davis, I. (2011). The effect of real-time gait retraining on hip kinematics, pain and function in subjects

with patellofemoral pain syndrome. *Br. J. Sports Med. 45, 691–696.*
96. O'Brien, T. D. (2016). Musculoskeletal proportionality, biomechanical considerations and their contribution to movement in adults and children. *Pediatr. Exerc. Sci. 28, 210–216*
97. O'Brien, T. D., Reeves, N. D., Baltzopoulos, V., Jones, D. A., and Maganaris, C. N. (2010). Muscle–tendon structure and dimensions in adults and children. *J. Anat. 216, 631–642.*
98. Petersen, T. H., Kliim-Due, M., Farmer, S. F., and Nielsen, J. B. (2010). Childhood development of common drive to a human leg muscle during ankle dorsiflexion and gait. *J. Physiol. 588, 4387–4400.*
99. Plisky, M., Rauh, M., Heiderscheit, B., Underwood, F., and Tank, R. (2007). An epidemiological investigation of medial tibial stress syndrome among high school cross-country runners. *J. Orthop. Sports Phys. Ther. 37, 40–47.*
100. Post, E. G., Trigsted, S. M., Riekena, J. W., Hetzel, S., McGuine, T. A., Brooks, M. A., et al. (2017). The association of sport specialization and training volume with injury history in youth athletes. *Am. J. Sports Med. 45, 1405–1412.*
101. Quatman-Yates, C. C., Quatman, C. E., Meszaros, A. J., Paterno, M. V., and Hewett, T. E. (2012). A systematic review of sensorimotor function during adolescence: a developmental stage of increased motor awkwardness? Br. *J. Sports Med. 46, 649–655.*
102. Rauh, M., Macera, C., and Marshall, S. (2011). Applied Sports Injury Epidemiology. *Athletic and Sport Issues in Musculoskeletal Rehabilitation. St Louis, MO: Saunders, 730–772.*
103. Rauh, M. J. (2014). Summer training factors and risk of musculoskeletal injury among high school cross-country runners. *J. Orthop. Sports Phys. Ther. 44, 793–804.*
104. Rauh, M. J. (2018). Leg-length inequality and running-related injury among high school runners. *Int. J. Sports Phys. Ther. 13:643.*
105. Rauh, M. J., Barrack, M., and Nichols, J. F. (2014). Associations between the female athlete triad and injury among high school runners. *Int. J. Sports Phys. Ther. 9:948.*
106. Rauh, M. J., Koepsell, T. D., Rivara, F. P., Margherita, A. J., and Rice, S. G. (2006). Epidemiology of musculoskeletal injuries among high school cross-country runners. *Am. J. Epidemiol. 163, 151–159.*
107. Rauh, M. J., Koepsell, T. D., Rivara, F. P., Rice, S. G., and Margherita, A. J. (2007). Quadriceps angle and risk of injury among high school cross-country runners. *J. Orthop. Sports Phys. Ther. 37, 725–733.*
108. Rauh, M. J., Margherita, A. J., Rice, S. G., Koepsell, T. D., and Rivara, F. P. (2000). High school cross country running injuries: a longitudinal study. *Clin. J. Sport Med. 10, 110–116.*
109. Rauh, M. J., Tenforde, A. S., Barrack, M. T., Rosenthal, M. D., and Nichols, J. F. (2018). Associations between sport specialization, running-related injury, and menstrual dysfunction among high school distance runners. *Athl. Train. Sports Health Care 10, 260–269.*
110. Reinking, M. F., Austin, T. M., and Hayes, A. M. (2010). Risk factors for self-reported exercise-related leg pain in high school cross-country athletes. *J. Athl. Train. 45, 51–57.*
111. Richmond, S. A., Kang, J., Doyle-Baker, P. K., Nettel-Aguirre, A., and Emery, C. A. (2016). A school-based injury prevention program to reduce sport injury risk and improve healthy outcomes in youth: a pilot cluster-randomized controlled trial. *Clin. J. Sport Med. 26, 291–298.*
112. Roberts, T. J., and Azizi, E. (2010). The series-elastic shock absorber: tendons attenuate muscle power during eccentric actions. *J. Appl. Physiol. 109, 396–404.*
113. Roper, J. L., Harding, E. M., Doerfler, D., Dexter, J. G., Kravitz, L., Dufek, J. S., et al. (2016). The effects of gait retraining in runners with patellofemoral pain: a randomized trial. *Clin. Biomech. 35, 14–22.*
114. Rössler, R., Donath, L., Verhagen, E., Junge, A., Schweizer, T., and Faude, O. (2014). Exercise-based injury prevention in child and adolescent sport: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med. 44, 1733–1748.*
115. Rumpf, M. C., Cronin, J. B., Oliver, J., and Hughes, M. (2015). Kinematics and kinetics of maximum running speed in youth across maturity. *Pediatr. Exerc. Sci. 27, 277–284.*
116. Ryan, M., Elashi, M., Newsham-West, R., and Taunton, J. (2014). Examining injury risk and pain perception in runners using minimalist footwear. *Br. J. Sports Med. 48, 1257–1262.*
117. Schedler, S., Kiss, R., and Muehlbauer, T. (2019). Age and sex differences in human balance performance from 6-18 years of age: a systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE 14:e0214434.*
118. Scheer, V., Costa, R. J. S., Doutreleau, S., Knechtle, B., Nikolaidis, P. T., Roberts, W. O., et al. (2021). Recommendations on youth participation in ultra-endurance running events: a consensus statement. *Sports Med. 51, 1123–1135.*
119. Schepens, B., Willems, P., and Cavagna, G. (1998). The mechanics of running in children. *J. Physiol. 509 (Pt 3):927.*
120. Sonneville, K. R., Gordon, C. M., Kocher, M. S., Pierce, L. M., Ramappa, A., and Field, A. E. (2012). Vitamin D, calcium, and dairy intakes and stress fractures among female adolescents. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med. 166, 595–600.*
121. Stearne, S. M., Alderson, J. A., Green, B. A., Donnelly, C. J., and Rubenson, J. (2014). Joint kinetics in rearfoot versus forefoot running: implications of switching technique. *Med. Sci. Sports Exerc. 46, 1578–1587.*
122. Stiffler-Joachim, M. R., Wille, C. M., Kliethermes, S. A., Johnston, W., and Heiderscheit, B. (2019). Foot angle and loading rate during running demonstrate a nonlinear relationship. *Med. Sci. Sports Exerc. 51, 2067–2072.*
123. Students run LA. (2021). Available online at: https://www. *srla.org/ (accessed February 2, 2021).*
124. Taddei, U. T., Matias, A. B., Duarte, M., and Sacco, I. C. (2020). Foot core training to prevent running-related injuries: a survival analysis of a single-blind, randomized controlled trial. *Am. J. Sports Med. 48, 3610–3619.*
125. Tenforde, A., DeLuca, S., Wu, A., Ke, A., Lewis, M., Rauh, M., et al. (2021). Prevalence and factors associated with bone stress injury in middle school runners. *PM R.*
126. Tenforde, A. S., Beauchesne, A. R., Borg-Stein, J., Hollander, K., McInnis, K., Kotler, D., et al. (2020). Awareness and comfort treating the female athlete triad and relative energy deficency in sport among healthcare p-roviders. *Dtsch Z Sportmed. 71, 76–80.*
127. Tenforde, A. S., Borgstrom, H. E., Outerleys, J., and Davis, I. S. (2019). Is cadence related to leg length and load rate? J. *Orthop. Sports Phys. Ther. 49, 280–283.*

128. Tenforde, A. S., and Fredericson, M. (2011). Influence of sports participation on bone health in the young athlete: a review of the literature. *PM R 3, 861–867.*
129. Tenforde, A. S., Fredericson, M., Sayres, L. C., Cutti, P., and Sainani, K. L. (2015). Identifying sex-specific risk factors for low bone mineral density in adolescent runners. *Am. J. Sports Med. 43, 1494–1504.*
130. Tenforde, A. S., Sayres, L. C., McCurdy, M. L., Collado, H., Sainani, K. L., and Fredericson, M. (2011). Overuse injuries in high school runners: lifetime prevalence and prevention strategies. *PM R 3, 125–131.*
131. Tenforde, A. S., Sayres, L. C., McCurdy, M. L., Sainani, K. L., and Fredericson, M. (2013). Identifying sex-specific risk factors for stress fractures in adolescent runners. *Med. Sci. Sports Exerc. 45, 1843–1851.*
132. Thijs, Y., Pattyn, E., Van Tiggelen, D., Rombaut, L., and Witvrouw, E. (2011). Is hip muscle weakness a predisposing factor for patellofemoral pain in female novice runners? A prospective study. *Am. J. Sports Med. 39, 1877–1882.*
133. Tirabassi, J., Brou, L., Khodaee, M., Lefort, R., Fields, S. K., and Comstock, R. D. (2016). Epidemiology of high school sports-related injuries resulting in medical disqualification: 2005–2006 through 2013–2014 academic years. *Am. J. Sports Med. 44, 2925–2932.*
134. Toresdahl, B. G., McElheny, K., Metzl, J., Ammerman, B., Chang, B., and Kinderknecht, J. (2020). A randomized study of a strength training program to prevent injuries in runners of the New York City Marathon. *Sports Health 12, 74–79.*
135. United States track field (2020). Available online at: https://www. *usatf.org/resources/statistics/records/national-records (accessed February 2, 2021).*
136. Warr, B. J., Fellin, R. E., Sauer, S. G., Goss, D. L., Frykman, P. N., and Seay, J. F. (2015). Characterization of foot-strike patterns: lack of an association with injuries or performance in soldiers. *Mil. Med. 180, 830–834.*
137. Waugh, C., Blazevich, A., Fath, F., and Korff, T. (2012). Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon. *J. Anat. 220, 144–155.*
138. Waugh, C. M., Korff, T., Fath, F., and Blazevich, A. J. (2014). Effects of resistance training on tendon mechanical properties and rapid force production in prepubertal children. *J. Appl. Physiol. 117, 257–266.*
139. Willy, R. W., and Davis, I. S. (2011). The effect of a hip-strengthening program on mechanics during running and during a single-leg squat. *J. Orthop. Sports Phys. Ther. 41, 625–632.*
140. Willy, R. W., Scholz, J. P., and Davis, I. S. (2012). Mirror gait retraining for the treatment of patellofemoral pain in female runners. *Clin. Biomech. 27, 1045–1051.*
141. World Health Organization (2018). Adolescent Mental Health. *Available online at: https://wwwwhoint/mental_health/maternal-child/adolescent/en/ (accessed February 2, 2021).*
142. Wu, A., Rauh, M., DeLuca, S., Lewis, M., Ackerman, K., Barrack, M., et al. (2021). Running related injuries in middle school cross country runners: prevalence and characteristics of common injuries. *PM R.*
143. Yagi, S., Muneta, T., and Sekiya, I. (2013). Incidence and risk factors for medial tibial stress syndrome and tibial stress fracture in high school runners. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc. 21, 556–563.*
144. Yong, J. R., Silder, A., Montgomery, K. L., Fredericson, M., and Delp, S. L. (2018). Acute changes in foot strike pattern and cadence affect running parameters associated with tibial stress fractures. *J. Biomech. 76, 1–7.*
145. Zadpoor, A. A., and Nikooyan, A. A. (2011). The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: a systematic review. *Clin. Biomech. 26, 23–28.*
146. Zimmermann, W. O., and Bakker, E. (2019). Reducing vertical ground reaction forces: the relative importance of three gait retraining cues. *Clin. Biomech. 69, 16–20.*