

# 1. Pliometría orientada a la salud del tendón de Aquiles. Dosificación, progresiones y métricas básicas para rendimiento y prevención de tendinopatías

## PLIOMETRY ORIENTED TO THE HEALTH OF THE ACHILLES TENDON. DOSAGE, PROGRESSIONS AND BASIC METRICS FOR PERFORMANCE AND PREVENTION OF TENDINOPATHIES

**María Pérez Honrubia**  
Graduada en Fisioterapia.

### RESUMEN

La pliometría orientada a la salud del tendón de Aquiles constituye una herramienta fundamental en el ámbito de la fisioterapia deportiva y la preparación física. Su correcta aplicación requiere comprender los fundamentos biomecánicos del ciclo de estiramiento-acortamiento, las respuestas estructurales del tejido tendinoso y la importancia de dosificar la carga de forma progresiva. La evidencia reciente demuestra que la pliometría, integrada dentro de programas multimodales, puede mejorar la rigidez funcional, optimizar la transmisión de fuerzas y contribuir a la prevención de tendinopatías cuando se aplican volúmenes, intensidades y frecuencias adecuadas.

Asimismo, el uso de métricas objetivas como el tiempo de contacto, el índice de fuerza reactiva y la rigidez del miembro inferior permite monitorizar la respuesta del tendón, ajustar la carga de entrenamiento y prevenir estados de sobrecarga. Este trabajo sintetiza los principios de dosificación, progresión, monitorización y aplicación clínica de la pliometría, ofreciendo un marco práctico y basado en la evidencia para su integración en deportistas, sujetos recreativos y procesos de readaptación. En conjunto, se presenta un modelo de intervención seguro y eficaz que combina pliometría, fuerza, control motor y monitorización objetiva con el fin de optimizar la función del tendón de Aquiles y reducir el riesgo de tendinopatías.

**Palabras clave:** Pliometría, tendón de Aquiles, biomecánica, monitorización, prevención, tendinopatías, readaptación.

### ABSTRACT

*Plyometric training for Achilles tendon health is a key component in sports physiotherapy and performance optimization. Its effective use requires understanding the biomechanical principles of the stretch-shortening cycle, the structural adaptations of tendon tissue, and the need for progressive load management. Recent evidence shows that plyometric training, when integrated into multimodal programs, can enhance functional stiffness, improve force transmission, and contribute to the prevention of tendinopathies when applied with appropriate volumes, intensities, and frequencies. Additionally, objective metrics such as contact time, reactive strength index and lower-limb stiffness provide valuable information to monitor tendon response, guide training load adjustments and prevent overload-related symptoms.*

*This work synthesizes the essential principles of plyometric dosage, progression, monitoring and clinical application, offering a practical and evidence-based framework for its implementation in athletes, recreational populations and rehabilitation settings. Overall, the proposed model emphasizes a safe and effective approach combining plyometrics, strength training, motor control strategies and objective monitoring to optimize Achilles tendon function and reduce the risk of tendinopathy.*

**Keywords:** Pliometry, achilles tendon, biomechanics, monitoring, prevention, tendinopathies, readjustment.

### INTRODUCCIÓN

La tendinopatía del tendón de Aquiles constituye una de las condiciones musculoesqueléticas más prevalentes en poblaciones activas y deportistas implicados en actividades de impacto (carrera, saltos, cambios de dirección). El tendón de Aquiles desempeña un papel primordial en la locomoción humana al actuar como elemento elástico que almacena y libera energía en el ciclo de estiramiento-acortamiento; esta capacidad es esencial para la eficiencia mecánica, pero lo expone a cargas repetitivas que, si no están dosificadas adecuadamente, pueden provocar desajustes entre estímulo y capacidad adaptativa y, como consecuencia, procesos de sobreuso y dolor<sup>1</sup>.

El entrenamiento pliométrico —orientado a optimizar el ciclo de estiramiento-acortamiento mediante ejercicios de salto y rebote— ha sido tradicionalmente utilizado con fines de rendimiento, pero en la última década ha ganado relevancia también en prevención y readaptación por su capacidad para inducir adaptaciones en la unidad músculo-tendón. Revisiones sistemáticas y metaanálisis recientes muestran efectos moderados de la pliometría sobre la rigidez tendinosa y una mejora consistente en parámetros de rendimiento (salto, fuerza), aunque la magnitud de es-

tos cambios depende de variables de programa como volumen, duración y tipo de ejercicio<sup>1</sup>.

Además, ensayos controlados indican que intervenciones de pliometría de corta duración y volumen controlado pueden mejorar la economía de carrera y ciertos indicadores funcionales en corredores amateurs, lo que sugiere beneficios funcionales más allá del mero aumento de fuerza. La aplicación diaria y progresiva de ejercicios de hopping mostró mejoras en la economía de carrera tras seis semanas, sin evidenciar necesariamente efectos adversos sobre el tendón cuando la carga fue progresiva y controlada<sup>2</sup>.

No obstante, la respuesta tendinosa a estímulos pliométricos no es homogénea. Estudios experimentales recientes compararon condicionamientos de carga y observaron que los efectos agudos sobre la rigidez del tendón pueden ser mínimos después de sesiones de bajo volumen de pliometría, mientras que la mejora del rendimiento (por ejemplo, altura de salto) puede ser evidente. Este tipo de hallazgos subrayan que las mejoras funcionales inmediatas no siempre reflejan cambios mecánicos del tendón y que la dosificación (volumen e intensidad) es crítica para dirigir adaptaciones estructurales<sup>3</sup>.

Desde un enfoque clínico y de rehabilitación, los ensayos controlados en pacientes con tendinopatía muestran que protocolos de alta carga (carga concéntrica, isométrica y excéntrica dirigida a altos niveles de %MVC) durante 8–12 semanas inducen mejoras mecánicas y morfológicas: aumentos de rigidez, reducción de la deformación máxima y aumento del área de sección transversal, acompañados de mejoras clínicas en dolor y función. Estos resultados avalan la utilidad de una exposición progresiva a cargas elevadas para promover adaptaciones protectoras en tendinopatía crónica<sup>4</sup>.

En población sedentaria y en sujetos no entrenados, trabajos recientes han empezado a definir volúmenes mínimos efectivos de entrenamiento pliométrico para mejorar propiedades viscoelásticas musculares y tendinosas sin generar sobrecarga. Ensayos controlados aleatorizados sugieren que volúmenes reducidos, bien periodizados como programas de 3 sesiones por semana con progresión del número de saltos, pueden producir adaptaciones favorables en semanas cortas (4–6 semanas), lo que es relevante para la prescripción clínica en prevención primaria<sup>5</sup>.

La monitorización y el control de la carga son elementos esenciales para integrar la pliometría en programas orientados a la salud tendinosa. Estudios recientes han analizado la respuesta aguda del tendón a diferentes tipos de calentamiento y han mostrado que ejercicios de alta intensidad (running, pliometría) aumentan de forma transitoria el flujo sanguíneo y la rigidez del tendón inmediatamente después del ejercicio, lo que podría reflejar cambios hemodinámicos y viscoelásticos temporales que deben considerarse al planificar la exposición a cargas más intensas en la misma sesión. Estos hallazgos apoyan la necesidad de periodizar la carga y de medir indicadores objetivos (rigidez, tiempos de contacto, RSI, ecografía) para diferenciar entre adaptaciones y reacciones agudas que no representan remodelado estructural<sup>6</sup>.

Finalmente, el grueso de la evidencia reciente (metaanálisis y estudios controlados) apunta a tres mensajes prácticos para fisioterapeutas y readaptadores: la pliometría puede aumentar la rigidez tendinosa y mejorar el rendimiento cuando se aplica con una progresión adecuada; la dosificación (volumen, intensidad, tipo de salto y duración del programa) determina en gran medida la naturaleza de la adaptación; y en el contexto de tendinopatía, los protocolos de alta carga estructurados durante al menos 8–12 semanas muestran efectos mecánicos y clínicos favorables. Por tanto, la integración de la pliometría en programas orientados a la salud del tendón de Aquiles exige criterios claros de prescripción, progresión y monitorización para maximizar beneficios y minimizar riesgos<sup>1,4,5</sup>.

## ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA DEL TENDÓN DE AQUILES

El tendón de Aquiles (AT, por sus siglas en inglés) es la estructura tendinosa más robusta del cuerpo humano, formada por la confluencia del sóleo y las cabezas medial y lateral del gastrocnemio, además de contribuciones menores del músculo plantar<sup>1</sup>.

Su inserción se realiza en la superficie posterior del calcáneo, mediante una entesis fibrocartilaginosa que soporta elevadas cargas durante la locomoción<sup>1</sup>.

### Estructura y subtendones

Un rasgo anatómico clave del tendón de Aquiles es su organización en subtendones torsionados. En particular, un metaanálisis reciente ha documentado una torsión media de aproximadamente 46° en este tendón, con variabilidad intersujeto significativa, lo que tiene implicaciones biomecánicas para la distribución de tensiones durante la carga. Al no ser esta torsión uniforme entre individuos, podría influir en el patrón de deformación interna bajo carga<sup>2</sup>.

Esta configuración torsionada permite cierta independencia mecánica entre los subtendones, lo que facilita la distribución de fuerzas generadas por los músculos del tríceps sural (sóleo y gastrocnemios) durante diferentes tareas motoras<sup>3</sup>. Además, recientes estudios *in vivo* han mostrado que esta estructura tridimensional compleja es clave para la eficiencia mecánica y la capacidad del tendón para adaptarse al entrenamiento<sup>3</sup>.

### Vascularización e inervación

La vascularización del tendón es relativamente limitada, especialmente en la zona media, lo que podría explicar por qué esa región es más susceptible a lesiones y procesos degenerativos<sup>4</sup>. Además, la estructura torsionada del tendón también puede comprometer el flujo sanguíneo, especialmente en los subtendones durante la contracción, según estudios que asocian la torsión del tendón con presión intratendinosa<sup>5</sup>.

En cuanto a su inervación, el tendón de Aquiles tiene terminaciones nerviosas aferentes ubicadas principalmente cerca de la unión músculo-tendinosa y de la entesis, inclu-

yendo mecanorreceptores (receptores de Golgi), corpúsculos de Ruffini y terminaciones libres que responden al dolor. Estos elementos sensoriales permiten al tendón detectar cambios de carga y tensión, lo que es fundamental para la regulación neuromuscular y la prevención de lesiones<sup>1</sup>.

### **Propiedades mecánicas y funcionales**

Desde un punto de vista biomecánico, el tendón de Aquiles se caracteriza por una combinación de rigidez y elasticidad, que le permite almacenar energía elástica durante la fase de carga y liberarla durante la propulsión. Estudios recientes han revisado cómo estas propiedades mecánicas (rigidez, módulo de Young, histéresis) son esenciales para la amortiguación, la amplificación de potencia y la absorción de impactos durante actividades locomotoras<sup>3</sup>.

En un análisis moderno del tendón humano, se ha destacado que el tendón de Aquiles contribuye a la eficiencia del movimiento no solo por su rigidez, sino también por su capacidad para modular la energía (almacenamiento y recuperación) en función de las demandas motoras, adaptándose mediante remodelado a lo largo del tiempo<sup>3</sup>.

También es relevante su comportamiento viscoelástico, el tendón no es un elemento puramente elástico, sino que presenta una respuesta dependiente del tiempo cuando se aplica tensión, lo que le confiere la capacidad de disipar parte de la energía o recuperarla según la tasa de carga<sup>1</sup>.

### **Factores de riesgo y mecanismos de lesión**

La aparición de lesiones en el tendón de Aquiles es multifactorial e implica la interacción entre factores anatómicos, mecánicos, metabólicos y de carga externa. En la actualidad, la literatura reciente destaca especialmente el papel de la carga repetitiva, la insuficiente recuperación y los cambios morfológicos del tendón como los principales detonantes del proceso patológico.

- **Factores de riesgo intrínsecos:** Uno de los factores intrínsecos más relevantes es la estructura interna del tendón, especialmente la variabilidad en la torsión de los subtendones. Se ha demostrado que una torsión más marcada puede generar patrones de deformación no uniformes durante la carga, lo que incrementa el riesgo de sobreuso debido a tensiones heterogéneas dentro del tendón<sup>2</sup>.

Asimismo, la vascularización reducida en la zona media del tendón —la región con menor perfusión— puede comprometer su capacidad de reparación ante cargas repetitivas. Estudios anatómicos recientes confirman que la microvasculatura del tendón presenta zonas de hipovascularización especialmente vulnerables a la degeneración<sup>9</sup>.

El estado del tejido y la composición del colágeno también influyen en la susceptibilidad a la lesión. Alteraciones en la organización fibrilar, aumento de hidratación intracelular y cambios en la proporción entre colágeno tipo I y tipo III se han asociado a menor capacidad de carga y mayor riesgo de degeneración tendinosa<sup>10</sup>.

- **Factores de riesgo extrínsecos:** En lo referente a los factores extrínsecos, la evidencia reciente señala que los incrementos bruscos de carga semanal, especialmente en corredores, son uno de los principales desencadenantes de tendinopatía aquilea. Un metaanálisis de 2024 identificó que incrementos rápidos del volumen de carrera y picos de carga acumulada se asocian significativamente a mayor incidencia de lesiones derivadas del sobreuso<sup>11</sup>.

El terreno y el tipo de actividad también influyen, actividades con fase aérea repetida (running, salto deportivo) generan niveles elevados de carga elástica en el tríceps sural y en el tendón, lo que puede superar la capacidad de recuperación del tejido si no existe periodización adecuada<sup>1</sup>.

Además, estudios en corredores recreativos han mostrado que en presencia de déficits de fuerza plantar flexora o alteraciones en la mecánica de la marcha, se incrementa la tensión en la unidad músculo-tendinosa, elevando el riesgo de lesión<sup>12</sup>.

- **Mecanismos de lesión:** El desarrollo de la tendinopatía aquilea se vincula a un desequilibrio entre la carga mecánica aplicada y la capacidad adaptativa del tejido. Recientes estudios mecánicos y ecográficos han confirmado que el tendón experimenta deformaciones cíclicas repetidas que, cuando superan un umbral crítico, producen desorganización fibrilar, incremento de la matriz interfibrilar y cambios celulares característicos del fenotipo degenerativo<sup>10</sup>.

Además, análisis en corredores han demostrado que durante el ciclo de carga el tendón se somete a altos niveles de tensión y velocidad de estiramiento, factores mecánicos asociados a mayor riesgo de lesión si la progresión de carga no está correctamente estructurada<sup>13</sup>.

Finalmente, un estudio clínico reciente mostró que las personas con historia previa de tendinopatía presentan aumento de y deformación anómala en comparativa con sujetos sanos, lo que sugiere que la patología previa altera el comportamiento mecánico del tendón y puede predisponer a recaídas si no se gestiona correctamente la carga<sup>14</sup>.

## **BASES DE LA PLIOMETRÍA**

### **Definición y fundamentos mecánicos**

La pliometría se define como un método de entrenamiento basado en la utilización del ciclo de estiramiento-acortamiento (CEA) para mejorar la producción de fuerza y la eficiencia mecánica del sistema músculo-tendón. Los ejercicios pliométricos incrementan la capacidad del tejido tendinoso para almacenar energía elástica durante una fase excéntrica rápida y liberarla inmediatamente después durante la fase concéntrica, potenciando la acción muscular mediante mecanismos neuromecánicos específicos<sup>15</sup>.

Este tipo de entrenamiento se fundamenta en la interacción entre los elementos elásticos en serie (principal-

mente el tendón de Aquiles), la rigidez musculotendinosa y la activación refleja del huso neuromuscular, que permite una rápida transición entre las fases del CEA, reduciendo el tiempo de contacto y aumentando la eficiencia del movimiento<sup>16</sup>.

### **Ciclo de estiramiento-acortamiento (CEA)**

El CEA consta de tres fases principales: Preactivación anticipatoria, fase excéntrica rápida, fase concéntrica inmediata.

El rendimiento en el CEA depende críticamente del tiempo de acoplamiento entre la fase excéntrica y la concéntrica; tiempos de contacto más cortos permiten una mayor reutilización de energía elástica y una mayor contribución del tendón al movimiento final. Estudios recientes han mostrado que variaciones en la altura de caída en ejercicios como los drop jumps modifican la dinámica fascicular y el grado de estiramiento tendinoso, lo que altera directamente la eficiencia del CEA<sup>17</sup>.

Asimismo, investigaciones con técnicas avanzadas de biomecánica han confirmado que la eficiencia del CEA depende no solo del comportamiento pasivo del tendón, sino también de la activación neural que modula la rigidez activa del complejo músculo-tendón durante la fase previa al contacto<sup>18</sup>.

### **Tipos de ejercicios pliométricos (saltos, lanzamientos, multisaltos, drop jumps, etc.)**

Los ejercicios pliométricos se pueden clasificar en distintas categorías según la dirección del vector de fuerza, el tiempo de contacto y la magnitud de la carga excéntrica:

- **Saltos de baja amplitud (hopping):** Caracterizados por tiempos de contacto cortos y orientación al desarrollo de la rigidez funcional del tobillo. Estudios recientes han mostrado que protocolos de hopping producen mejoras en la economía de carrera y en la capacidad reactiva tras seis semanas de intervención<sup>19</sup>.
- **Multisaltos (bounds):** Requieren desplazamientos horizontales o verticales repetidos, generando cargas elásticas moderadas o altas dependiendo de la longitud y continuidad de los saltos. Este tipo de ejercicio se utiliza para desarrollar resistencia elástica específica y tolerancia a cargas repetidas<sup>20</sup>.
- **Drop jumps (DJ):** Implican una caída previa desde una plataforma para potenciar la fase excéntrica. La literatura moderna demuestra que la altura de caída modula la carga tendinosa y el rendimiento del CEA, siendo un parámetro crítico en la programación segura del ejercicio<sup>17</sup>.
- **Pliometría horizontal y lanzamientos:** Involucra desplazamientos horizontales y acciones balísticas que requieren de coordinación intermuscular compleja. Estos ejercicios se utilizan para mejorar la capacidad de aceleración, desaceleración y cambio de dirección<sup>20</sup>.

Cada tipo de ejercicio genera perfiles diferentes de tiempo de contacto, carga de pico y tasa de desarrollo de la fuerza (RFD), por lo que su selección debe corresponder a los obje-

tivos del programa (por ejemplo, aumentar rigidez tendinosa y mejorar salto vertical).

### **Beneficios neuromusculares y tendinosos**

El entrenamiento pliométrico mejora tanto la función neural como la mecánica del sistema músculo-tendón. En el plano neuromuscular, la pliometría incrementa la tasa de desarrollo de la fuerza (RFD), mejora la coordinación intermuscular y reduce la latencia de respuesta en acciones reactivas<sup>16</sup>.

Desde la perspectiva del tendón, investigaciones recientes han documentado aumentos en la rigidez tendinosa, reducciones en la histéresis y mejoras en la eficiencia del almacenamiento y liberación de energía tras programas de 8 a 12 semanas de entrenamiento<sup>21</sup>.

Adicionalmente, estudios comparativos han mostrado que la combinación de fuerza tradicional y pliometría genera adaptaciones tendinosas más favorables que la aplicación aislada de un solo método, lo que sugiere un efecto sinérgico sobre la remodelación del complejo músculo-tendón<sup>22</sup>.

### **Evolución histórica y aportes de la literatura reciente**

Aunque la pliometría fue inicialmente concebida como un método de mejora de la potencia en atletas de élite, los avances de los últimos cinco años han ampliado sustancialmente el marco de aplicación. Las nuevas investigaciones se han centrado en la prescripción segura, los umbrales de carga óptimos, los efectos sobre la salud tendinosa y la respuesta de poblaciones recreativas o clínicas, consolidando evidencia sólida para su uso en prevención y readaptación.

Revisiones sistemáticas recientes han confirmado que la pliometría es un medio eficaz para mejorar el rendimiento, pero también un estímulo fisiológico adecuado para favorecer la adaptación del tendón —siempre que se respete una progresión de carga controlada y basada en la evidencia<sup>15,19</sup>.

## **ADAPTACIONES DEL TENDÓN AL ENTRENAMIENTO PLIOMÉTRICO**

### **Cambios estructurales: rigidez, módulo elástico y sección transversal**

La evidencia reciente indica que el entrenamiento pliométrico puede inducir adaptaciones significativas en las propiedades mecánicas del tendón, especialmente en su rigidez. La revisión sistemática y metaanálisis de Ramírez-delaCruz et al. (2022) mostró un efecto moderado del entrenamiento pliométrico sobre la rigidez de los tendones de las extremidades inferiores, indicando que un programa estructurado de saltos puede incrementar el módulo elástico del tendón en adultos sanos<sup>23</sup>.

Sin embargo, este mismo análisis no encontró cambios consistentes en el área de sección transversal (CSA) del tendón, lo que sugiere que el tejido puede volverse más

rígido o eficiente sin requerir necesariamente un aumento de su grosor<sup>23</sup>. Esta ausencia de cambios morfológicos relevantes concuerda con la idea de que las adaptaciones del tendón al entrenamiento explosivo son principalmente cualitativas (alineamiento de fibras, reducción de fluidez interna, modificaciones de la matriz extracelular) más que cuantitativas.

Los estudios experimentales refuerzan estas observaciones. Kubo et al. (2021) mostraron que 12 semanas de entrenamiento pliométrico incrementaron la rigidez activa y redujeron la histéresis durante contracciones balísticas, reflejando una mayor eficiencia en la transmisión de energía durante el ciclo estiramiento-acortamiento (CEA)<sup>24</sup>. La reducción de histéresis implica que el tendón pierde menos energía por ciclo, lo que permite reutilizar una mayor fracción de la energía elástica almacenada.

A pesar de estos hallazgos, existe heterogeneidad intersujeto e interestudio. Diferentes protocolos —volumen, intensidad, técnica de salto— producen adaptaciones distintas. Algunos estudios, especialmente aquellos con volúmenes reducidos o participantes poco entrenados, no encuentran cambios significativos en la rigidez o propiedades pasivas del tendón de Aquiles. Por ello, las conclusiones deben interpretarse dentro del marco de la dosificación y experiencia de los sujetos.

### **Adaptaciones neuromecánicas y de control motor**

Además de los cambios estructurales, el entrenamiento pliométrico induce adaptaciones relevantes en el control motor y la dinámica músculo-tendinosa. El estudio de Kubo et al. (2021) reportó que, tras varias semanas de trabajo pliométrico, los participantes mostraron una mayor rigidez activa durante saltos, un acortamiento fascicular más rápido y una mejora en la coordinación entre la fase excéntrica y concéntrica del movimiento<sup>24</sup>. Estos cambios permiten una utilización más eficiente del CEA, optimizando la capacidad reactiva del sistema musculotendinoso.

Otro hallazgo clave en la literatura es la mejora del tiempo de acoplamiento y el incremento en la activación anticipatoria del tríceps sural en la fase previa al contacto, lo que favorece la preactivación muscular y la protección tendinosa durante impactos repetidos. Estas adaptaciones neuromecánicas facilitan la transmisión eficiente de energía y reducen la carga mecánica excesiva en el tendón.

Sin embargo, parte de la evidencia indica que no todas las poblaciones responden igual. Algunos programas de baja intensidad no modifican la rigidez pasiva del tendón, aunque sí mejoran variables de rendimiento muscular. Esto sugiere que la magnitud del estímulo mecánico es un factor determinante para generar cambios tendinosos medibles. Además, los métodos de medición utilizados en los estudios (miotónica, dinamometría, ultrasonido) no siempre evalúan exactamente la misma propiedad, lo que contribuye a cierta variabilidad en los resultados.

### **Relación entre carga elástica, volumen de entrenamiento y salud tendinosa**

La relación entre dosis de carga pliométrica y adaptaciones del tendón es uno de los aspectos más críticos. Una de las conclusiones del metaanálisis de Ramírez-de-laCruz et al. es que la rigidez aumenta de forma consistente en la mayoría de los estudios, pero el CSA no lo hace<sup>23</sup>. Este desajuste entre cambios mecánicos y estructurales plantea la cuestión de si un tendón más rígido, pero no más grueso, puede soportar mayores cargas repetidas sin incrementar la susceptibilidad al estrés.

La literatura reciente analiza también intervenciones comparativas. En el estudio de Moran et al. (2021), se observó que la rigidez del miembro inferior aumentaba con mayores volúmenes de entrenamiento pliométrico, pero que existía un umbral óptimo a partir del cual los beneficios disminuían<sup>25</sup>. Esto sugiere que la dosificación debe ser precisa: volúmenes moderados de saltos pueden favorecer la adaptación, mientras que cargas excesivas podrían producir fatiga tendinosa.

Boonchum et al. (2022) compararon entrenamiento excéntrico con pliometría en corredores de media y larga distancia, encontrando que ambos métodos incrementaban la rigidez del tendón de Aquiles a lo largo de seis semanas, aunque sin cambios estructurales relevantes<sup>26</sup>. Este resultado respalda la idea de que distintos tipos de carga mecánica pueden producir adaptaciones similares en la mecánica tendinosa.

La discusión más relevante es si estos cambios mecánicos implican o no un efecto protector frente a lesiones. Aunque una mayor rigidez puede mejorar la capacidad reactiva y eficiencia del tendón, también podría reducir la capacidad de deformación tolerable, lo que en poblaciones no preparadas podría generar mayor riesgo. La dosificación se vuelve, por tanto, un factor determinante en la salud tendinosa.

### **Evidencia científica sobre la relación entre pliometría y prevención de tendinopatías**

A diferencia del abundante cuerpo de literatura sobre rendimiento, los estudios que relacionan pliometría con prevención directa de tendinopatía del tendón de Aquiles son escasos. La mayoría de la evidencia es indirecta.

Las intervenciones sobre tendón patológico sí ofrecen información valiosa. El trabajo de Bayliss et al. (2023) mostró que intervenciones de alta carga aumentan la rigidez y el área de sección transversal en sujetos con tendinopatía de Aquiles, mejorando la función y reduciendo los síntomas<sup>27</sup>. Aunque no se trata de entrenamiento pliométrico, este hallazgo confirma que el tendón lesionado puede adaptarse de forma positiva al estímulo mecánico si se controla dosis y progresión.

En deportistas sanos, estudios biomecánicos como el de Chiu et al. (2023) identifican asociaciones entre mayor rigidez del tendón, mejor índice de fuerza reactiva y mayor rendimiento en acciones balísticas<sup>28</sup>. Aunque estos resultados no prueban protección contra tendinopatías, sugie-

ren que un tendón más eficiente mecánicamente podría tolerar mejor las fuerzas repetidas de impacto.

En resumen, aunque la pliometría induce cambios relevantes en rigidez y eficiencia del CEA, no existe aún evidencia longitudinal sólida que demuestre de forma directa la reducción de la incidencia de tendinopatías. Es más apropiado considerarla una herramienta dentro de una estrategia preventiva multifactorial que incluya fuerza, control de carga, progresiones adecuadas, recuperación y trabajo neuromuscular.

## PRINCIPIOS DE DOSIFICACIÓN EN PLIOMETRÍA

### **Volumen, intensidad y densidad de entrenamiento**

La dosificación del entrenamiento pliométrico debe considerar principalmente el volumen total de saltos, la intensidad de los ejercicios y la densidad temporal del entrenamiento. La evidencia disponible indica que las adaptaciones tendinosas y neuromusculares se ven influidas por la cantidad de contactos y la magnitud de las fuerzas involucradas.

El metaanálisis de Ramírez-delaCruz et al. (2022) mostró que programas de pliometría bien estructurados producen incrementos moderados en la rigidez tendinosa, pero la respuesta depende de la carga aplicada y de la duración de la intervención<sup>23</sup>. Además, trabajos centrados en la respuesta de rigidez del miembro inferior señalan que volúmenes moderados de entrenamiento pueden ser más eficaces para inducir mejoras sin incrementar el riesgo de sobrecarga, especialmente en población recreativa o en fases iniciales de programación<sup>25</sup>.

En relación con la intensidad, revisiones metodológicas recientes subrayan que no debe aumentarse simultáneamente volumen e intensidad, sino que ambas variables deben progresar de forma independiente y gradual<sup>32</sup>. De este modo, la carga mecánica aplicada al tendón de Aquiles puede controlarse adecuadamente, minimizando picos de estrés que puedan generar irritación o fatiga acumulada.

La “densidad” del entrenamiento —relación entre trabajo y descanso dentro de la sesión— no cuenta con evidencia empírica reciente específica sobre el tendón de Aquiles. Sin embargo, desde un enfoque biomecánico, una mayor densidad sin recuperación suficiente tiende a aumentar el tiempo bajo carga repetida, lo que podría amplificar la fatiga tendinosa. Por tanto, se recomienda incluir pausas amplias entre series de saltos reactivos y evitar acumulaciones prolongadas de impactos consecutivos, especialmente en niveles iniciales.

### **Selección de ejercicios según nivel del sujeto (inicial, intermedio, avanzado)**

La evidencia reciente sugiere que la selección de ejercicios debe realizarse en función del nivel de experiencia y de la capacidad técnica del sujeto. Revisiones sistemáticas centradas en protocolos de entrenamiento pliométrico subrayan la importancia de progresar desde ejercicios de bajo impacto hacia tareas de mayor demanda mecánica, controlando la calidad del movimiento en cada fase<sup>32,33</sup>.

#### • Nivel inicial

- *Hopping bilateral y unilateral de baja amplitud.*
- *Saltos verticales con énfasis en técnica de aterrizaje.*
- *Multisaltos cortos con desplazamientos controlados.*

Estos ejercicios favorecen la adaptación neuromuscular inicial sin exponer al tendón de Aquiles a picos de carga excesivos.

#### • Nivel intermedio

- *Multisaltos horizontales y verticales con mayor amplitud.*
- *Saltos en banco bajo o superficies ligeramente elevadas.*
- *Cambios de dirección con saltos controlados.*

En esta fase puede introducirse un aumento progresivo de la intensidad, siempre que se mantenga adecuada estabilidad lumbopélvica y alineación del tobillo en el aterrizaje.

#### • Nivel avanzado

- *Drop jumps desde alturas progresivas.*
- *Saltos reactivos de baja duración de contacto.*
- *Saltos con carga externa moderada.*

El uso de ejercicios avanzados sólo es adecuado cuando el sujeto domina la técnica, tolera volúmenes moderados y presenta buena capacidad de recuperación entre sesiones. La literatura destaca que el incremento de intensidad debe basarse en la calidad del movimiento más que en la simple ampliación del repertorio de ejercicios<sup>32,33</sup>.

### **Frecuencia semanal y tiempo de recuperación**

Los estudios que examinan la relación entre volumen semanal y adaptaciones mecánicas señalan que frecuencias de 1–2 sesiones por semana suelen ser suficientes para obtener mejoras en rendimiento y rigidez, sin aumentar de forma desproporcionada la carga tendinosa<sup>25,33</sup>.

Además, la intervención debe mantenerse durante al menos 6–8 semanas para que se produzcan adaptaciones apreciables en el tejido conectivo, tal como se describe en intervenciones que muestran mejoras en rigidez y eficiencia del ciclo de estiramiento-acortamiento<sup>23,25</sup>.

Respecto al tiempo de recuperación, la literatura reciente no ofrece valores exactos para el tendón de Aquiles. Sin embargo, los estudios de respuesta neuromuscular y de rendimiento sugieren que un intervalo de 48–72 horas entre sesiones es razonable para permitir la recuperación tendinosa, especialmente en niveles intermedios e iniciales. Esta recomendación se sustenta en análisis que muestran que excesiva frecuencia o acumulación de impacto puede interferir con la adaptación mecánica<sup>32,34</sup>.

### **Superficies, calzado y entorno de trabajo**

Este apartado carece de evidencia directa reciente y específica sobre el tendón de Aquiles. Ninguna de las referencias actuales dentro de la ventana temporal exigida aborda de forma empírica el impacto del tipo de superficie, calzado o entorno en la carga tendinosa durante la pliometría.

Por tanto, se abordan estos aspectos desde principios biomecánicos y consenso profesional:

- **Superficies más rígidas** (pista, cemento) aumentan la magnitud del impacto y la velocidad de transmisión de fuerzas, lo que incrementa el estrés sobre el tendón.
- **Superficies más amortiguadas** (césped, goma deportiva) reducen parcialmente el pico de carga, siendo útiles en fases iniciales.

El calzado con ligera amortiguación y buen control del reprotipé reduce la transmisión abrupta de fuerzas y puede ser preferible en sujetos noveles o en readaptación.

El entorno debe permitir espacio libre, ausencia de obstáculos y una superficie estable, evitando compensaciones y pérdida de control motor.

Estas recomendaciones no sustituyen evidencia científica, pero representan buenas prácticas ampliamente aceptadas en fisioterapia deportiva y en la preparación física.

### **Errores comunes en la dosificación y su impacto en el tendón de Aquiles**

Los errores de dosificación son responsables de un gran número de sobrecargas tendinosas, especialmente cuando se incrementan el volumen o la intensidad de forma abrupta.

Los errores más frecuentes incluyen:

- **Aumentar simultáneamente volumen e intensidad:** La literatura advierte que esta combinación es uno de los factores más críticos de sobrecarga<sup>32</sup>.
- **Introducir ejercicios avanzados sin dominio técnico previo:** Los drop jumps o pliometría reactiva sin control motor pueden aumentar excesivamente el tiempo bajo tensión excéntrica rápida, incrementando el estrés tendinoso<sup>33</sup>.
- **Reducir insuficientemente los periodos de descanso entre sesiones:** Esto limita la recuperación fisiológica del tendón, interfiriendo con las adaptaciones mecánicas positivas<sup>34</sup>.
- **Ejecutar saltos en superficies inadecuadas:** Aunque no existan estudios recientes específicos, se reconoce que superficies excesivamente rígidas elevan el pico de impacto.
- **Sobrestimar la tolerancia del tendón en fases de readaptación:** La literatura muestra que el tendón lesionado responde positivamente a la carga progresiva, pero un exceso puede revertir los avances<sup>27</sup>.

En conjunto, estos errores pueden aumentar la rigidez en exceso, generar fatiga tendinosa o desencadenar síntomas característicos de tendinopatía del Aquiles.

### **PROGRESIONES Y PERIODIZACIÓN**

La programación de la pliometría requiere una estructuración deliberada que permita progresar desde estímulos de baja exigencia mecánica hasta tareas específicas que desafíen la reactividad del ciclo estiramiento-acortamiento (CEA). Esta progresión debe respetar los principios de carga, la tolerancia individual del tendón de Aquiles y la integración coherente dentro de un programa global de fuerza y prevención.

#### **Fases de progresión: introducción desarrollo y especificidad**

Numerosos trabajos recientes sobre pliometría señalan que las adaptaciones dependen de la dosificación y del nivel del sujeto, destacando la importancia de escalonar la progresión mediante fases estructuradas<sup>32,33,34</sup>. Aunque la literatura no ofrece un modelo único, existe consenso en dividir el proceso en tres fases:

#### • **Fase 1 — Introducción y adaptación estructural**

– *Objetivo:*

- » Establecer control motor.
- » Desarrollar técnica de aterrizaje.
- » Preparar al tendón para impactos repetidos sin provocar irritación.

– *Características:*

- » Baja intensidad, bajo volumen.
- » Saltos simples (hopping, saltos en el lugar).
- » Tiempo de contacto moderado-largo.
- » Énfasis en amortiguación, alineación y control de rodilla-tobillo.

– *Apoyo científico:*

- » Los estudios que muestran mejoras en rigidez con cargas moderadas apoyan que las primeras semanas deben priorizar la adaptación progresiva<sup>23,25</sup>.

#### • **Fase 2 — Desarrollo o progresión reactiva**

– *Objetivo:*

- » Mejorar la capacidad reactiva.
- » Aumentar la velocidad de acoplamiento del CEA.
- » Incrementar gradualmente la intensidad del estímulo mecánico.

– *Características:*

- » Volumen moderado-alto según nivel.

- » Multisaltos, saltos horizontales y verticales más exigentes.
  - » Introducción progresiva de drop jumps con alturas bajas-medias.
  - » Tiempo de contacto medio-corto.
  - *Apoyo científico:*
    - » Revisiones recientes subrayan que la progresión debe aumentar la intensidad de manera aislada, sin incrementar simultáneamente el volumen, para optimizar la adaptación tendinosa<sup>32,34</sup>.
- **Fase 3 — Especificidad y rendimiento**
- *Objetivo:*
    - » Máxima eficiencia reactiva.
    - » Tiempo de contacto muy corto.
    - » Transferencia al rendimiento deportivo o a demandas específicas del usuario.
  - *Características:*
    - » Drop jumps desde alturas individualizadas.
    - » Saltos reactivos encadenados.
    - » Cargas dirigidas al RSI.
    - » Alta exigencia neuromecánica.
  - *Apoyo científico:*
    - » El metaanálisis sobre pliometría en jóvenes y atletas muestra que la exposición controlada a contactos rápidos es clave para mejorar el rendimiento y la capacidad de reutilización de energía elástica<sup>33</sup>.

### Progresiones según tipo de salto y tiempo de contacto

La progresión no solo depende de la fase del plan, sino también del tipo de salto y del tiempo de contacto (TC).

La evidencia reciente destaca la importancia del control sobre la intensidad, ya que esta depende de la fuerza de impacto, el desplazamiento vertical y el TC<sup>32,34</sup>.

A continuación, se presenta un modelo progresivo basado en principios biomecánicos y respaldado por la literatura general de pliometría:

• **Nivel 1 — TC largo (>250 ms)**

- Saltos verticales controlados.
- Saltos con doble apoyo.
- Amortiguación lenta.

*Uso recomendado en fases iniciales y readaptación.*

• **Nivel 2 — TC moderado (150–250 ms)**

- Multisaltos horizontales.

- Saltos en banco bajo.
- Ciclos continuos con control de la técnica.

*Estos ejercicios preparan al tendón para mayores demandas mecánicas, en línea con progresiones recomendadas por estudios de volumen e intensidad<sup>25,32</sup>.*

• **Nivel 3 — TC corto (<150 ms)**

- Drop jumps.
- Saltos reactivos con rebote inmediato.
- Saltos encadenados de máxima velocidad.

*Revisiones globales indican que esta categoría es la que más se asocia a mejoras significativas en la rigidez funcional y el rendimiento reactivo<sup>33,34</sup>, por lo que deben reservarse para sujetos avanzados o fases finales.*

### Integración de la pliometría en programas de fuerza y prevención

Los datos recientes muestran que la pliometría influye positivamente en la rigidez del tendón y en la eficiencia mecánica del complejo músculo-tendón<sup>23,24,25</sup>. Sin embargo, por sí sola no constituye una estrategia de prevención de tendinopatías, por lo que debe integrarse en programas multimodales.

#### Principios de integración:

- **Combinar con fuerza pesada:** La fuerza máxima y la fuerza excéntrica aumentan la capacidad del tendón para tolerar carga. Su combinación con pliometría favorece un desarrollo equilibrado entre rigidez, fuerza y control neuromuscular<sup>27</sup>.
- **Incluir isometrías e isotónicos lentos:** Estos ejercicios ayudan a modular la rigidez y mejorar la función del tendón patológico o irritado, facilitando la tolerancia a la carga explosiva.
- **Ubicación en la sesión:** La pliometría debe ejecutarse al inicio del entrenamiento, con baja fatiga neuromuscular, para maximizar la calidad técnica y reducir riesgo.
- **Monitorización de carga:** Las revisiones recientes destacan la importancia de cuantificar contactos y controlar la progresión mediante indicadores como frecuencia, volumen y técnica<sup>32,34,35</sup>.

### Ejemplos de microciclos y macrociclos orientados a la salud tendinosa

Ejemplo de microciclo (1 semana) → Objetivo: progresión moderada del estímulo con enfoque en salud tendinosa.

• **Día 1 — Técnica + Pliometría baja intensidad**

- Hopping bilateral (3 × 20).
- Saltos verticales controlados (3 × 10).
- Multisaltos cortos (2 × 10).

- **Día 3 — Pliometría moderada + fuerza**

- Multisaltos horizontales (3 × 10).
- Saltos reactivos suaves (3 × 6) — TC 150–250 ms.
- Sentadilla pesada 3 × 5 (integración de fuerza y rigidez).

- **Día 5 — Reactividad controlada**

- Drop jumps desde 20–30 cm (3 × 6).
- Saltos con rebote moderado (2 × 8).

Ejemplo de macrociclo (8–12 semanas) → Se estructura según las fases previas:

- **Semanas 1–4 (adaptación):**

- 1–2 sesiones/semana.
- Volumen bajo.
- TC largo.
- Enfoque en técnica.

- **Semanas 5–8 (progresión reactiva):**

- 2 sesiones/semana.
- Volumen moderado.
- Introducción a multisaltos y drop jumps bajos.
- Trabajo complementario de fuerza y estabilidad.

- **Semanas 9–12 (especificidad):**

- 1–2 sesiones/semana.
- TC corto.
- Saltos reactivos avanzados.
- Control estricto de síntomas y recuperación.

## MÉTRICAS BÁSICAS DE CONTROL

El control y la monitorización de las cargas en el entrenamiento pliométrico constituyen un componente esencial para optimizar el rendimiento y preservar la salud del tendón de Aquiles. La literatura reciente enfatiza que la correcta interpretación de variables como el tiempo de contacto, la altura de salto, la rigidez del sistema músculo-tendón o los índices reactivos permite ajustar la carga de manera individualizada y evitar sobrecargas innecesarias<sup>32,33,35</sup>. Este apartado describe las métricas fundamentales empleadas en la fisioterapia deportiva y en la preparación física moderna, así como su aplicación práctica en el contexto de la pliometría orientada a la salud tendinosa.

### Relación fuerza-tiempo y rigidez

La relación fuerza-tiempo representa la capacidad del sistema neuromuscular para generar fuerza en distintos intervalos temporales, y es uno de los determinantes clave del rendimiento pliométrico. Esta relación influye directamente

en la rigidez del miembro inferior, entendida como la capacidad de los tejidos para resistir deformación bajo cargas rápidas.

Los estudios recientes han demostrado que la pliometría bien dosificada puede incrementar la rigidez del tendón y del complejo músculo-tendón<sup>23,25</sup>. En particular, Moran et al. mostraron que programas de saltos bien estructurados modifican la rigidez de la extremidad inferior en función del volumen aplicado, subrayando la importancia del control de la carga para evitar excesos que puedan comprometer la salud tendinosa<sup>25</sup>.

Asimismo, investigaciones que analizan la rigidez durante actividades de carrera y salto evidencian que el incremento progresivo de rigidez es un mecanismo adaptativo favorable, siempre que no se produzca una elevación excesiva que limite la capacidad de absorción mecánica o genere irritación en tendones sometidos a estrés repetitivo<sup>31</sup>. Este equilibrio entre rigidez útil y rigidez patológica es fundamental en la monitorización clínica del tendón de Aquiles.

El control de la rigidez puede realizarse mediante pruebas de saltos repetidos, drop jumps o mediciones de dispositivos especializados. Aunque la literatura reciente destaca metodologías precisas de control del volumen y la intensidad en drop jumps<sup>32</sup>, aún no existe un consenso definitivo sobre valores ideales de rigidez para la prevención de tendinopatías. No obstante, estos parámetros son útiles para observar tendencias de adaptación, especialmente cuando se integran en programas de larga duración.

### Reactive Strength Index (RSI) y RSI-mod

El Reactive Strength Index (RSI) es una de las métricas más valiosas para evaluar la capacidad del sujeto de acoplar de forma eficiente las fases excéntrica y concéntrica del ciclo de estiramiento-acortamiento. Se define como la relación entre la altura de salto y el tiempo de contacto durante un drop jump. Valores elevados indican mayor reactividad, eficiencia neuromuscular y economía del gesto.

Revisiones recientes subrayan que los drop jumps y los ejercicios de tiempo de contacto corto son determinantes para el desarrollo del RSI y su aplicación tanto clínica como deportiva<sup>32,34</sup>. El RSI es especialmente relevante en el control del tendón de Aquiles, dado que refleja la capacidad del tejido para soportar cargas rápidas y devolver energía elástica sin deterioro funcional.

El RSI-mod, basado en tests de salto sin plataforma elevada (como el CMJ), proporciona una alternativa útil cuando se busca evaluar la reactividad sin la influencia del tiempo de contacto extremadamente corto. Aunque no existen estudios recientes centrados exclusivamente en RSI-mod en relación con el tendón de Aquiles, este índice ofrece una valoración complementaria de la eficiencia mecánica y puede integrarse fácilmente en procesos de readaptación.

El uso sistemático de RSI y RSI-mod permite:

- **Observar cambios en la eficiencia neuromuscular.**

- **Detectar fatiga acumulada asociada a descensos del rendimiento.**
- **Ajustar el volumen e intensidad del entrenamiento, especialmente en fases reactivas o avanzadas.**
- **Anticipar posibles riesgos de sobrecarga cuando se detectan caídas repetidas del rendimiento sin causa aparente.**

Revisiones globales de pliometría destacan que estas métricas son fundamentales para monitorizar progresiones y evitar errores de dosificación<sup>34</sup>.

#### **Altura de salto, tiempo de vuelo y tiempo de contacto**

La altura de salto, el tiempo de vuelo y el tiempo de contacto constituyen variables esenciales para valorar la calidad del movimiento pliométrico y su impacto en el tendón de Aquiles. Estos parámetros pueden medirse mediante plataformas de fuerza, aplicaciones móviles validadas o dispositivos portátiles.

- **Altura de salto** → Es un indicador indirecto de la capacidad explosiva y del uso efectivo del CEA. Aunque por sí sola no refleja la carga tendinosa, permite evaluar la eficiencia de la cadena cinética durante la fase concéntrica. La literatura reciente subraya que mejoras moderadas en la altura de salto se asocian con programas de pliometría bien dosificada<sup>23,34</sup>.
- **Tiempo de contacto (TC)** → El TC es una de las métricas más importantes para la salud tendinosa, ya que refleja la velocidad de acoplamiento excéntrico-concéntrico. El control del TC es esencial para diferenciar entre saltos de alta o baja reactividad.

#### *Clasificación general:*

- *TC largo (>250 ms): bajo impacto, útil en fases iniciales.*
- *TC moderado (150–250 ms): progresión intermedia.*
- *TC corto (<150 ms): alta reactividad (drop jumps), mayor estrés tendinoso.*

Los estudios sobre optimización del volumen en drop jumps destacan la relación directa entre el TC y la intensidad mecánica aplicada al tendón<sup>32</sup>.

- **Tiempo de vuelo** → Refleja la potencia generada y se utiliza junto al TC para analizar la curva reactividad-potencia. Aunque no es un indicador directo de carga tendinosa, su combinación con RSI y rigidez ofrece una visión integral del estado neuromuscular.

#### **Velocidad de desarrollo de la fuerza (RFD)**

La RFD es la capacidad de generar fuerza rápidamente y es un parámetro clave en acciones explosivas. Aunque la literatura de los últimos cinco años no ha abordado específicamente la RFD en relación directa con la pliometría y el tendón de Aquiles, sí existen evidencias indirectas que la vinculan con mejoras en el rendimiento explosivo y eficiencia del CEA<sup>23,34</sup>.

La RFD depende de factores como:

- **Activación neural temprana.**
- **Coordinación intermuscular.**
- **Rigidez efectiva del sistema músculo-tendón.**

El entrenamiento pliométrico, especialmente en fases avanzadas con TC corto, estimula la capacidad del sistema para aplicar fuerza rápidamente. La integración de la RFD en la monitorización permite:

- **Detectar deterioros en el rendimiento asociados a fatiga neuromuscular.**
- **Ajustar cargas semanales.**
- **Observar progresiones en fases específicas del programa.**

Dado que la RFD no posee un protocolo estandarizado en la literatura reciente para el tendón de Aquiles, su interpretación debe hacerse con precaución y combinada con otras métricas como RSI y rigidez.

#### **Herramientas y dispositivos tecnológicos para el monitoreo**

Durante los últimos años ha aumentado significativamente el uso de herramientas tecnológicas para el monitoreo de la pliometría y de la carga tendinosa. Parte de esta tendencia está reflejada en estudios recientes que analizan nuevas métricas como la frecuencia total de contactos con el suelo (TGCF) o indicadores compuestos<sup>35</sup>.

Dispositivos y herramientas más utilizadas:

- **Plataformas de fuerza** → Permiten medir TC, tiempo de vuelo, altura de salto, impulsos y curvas fuerza-tiempo. Son el estándar de referencia y la herramienta más precisa.
- **Acelerómetros y unidades inerciales (IMUs)** → Aunque la literatura reciente no aporta evidencia específica sobre su uso en tendón de Aquiles, se están consolidando como herramientas válidas para estimaciones aproximadas de carga, especialmente en contextos de campo.
- **Aplicaciones móviles validadas** → Algunas aplicaciones permiten medir tiempo de vuelo y altura de salto con alta fiabilidad. Su utilidad en programas de salud tendinosa depende de la posibilidad de registrar tendencias en rendimiento a lo largo del tiempo.
- **Sistemas ópticos y plataformas portátiles** → Nuevos sistemas de bajo coste permiten registrar TC y RSI. Revisiones recientes sobre herramientas de cuantificación de carga indican que estos dispositivos pueden ser útiles para monitorizar la progresión del entrenamiento, especialmente cuando se integran métricas compuestas como TGCF<sup>35</sup>.

## INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS MÉTRICAS

Las métricas derivadas del análisis del movimiento pliométrico permiten cuantificar la carga real soportada por el tendón de Aquiles y evaluar la capacidad del sistema neuromuscular para tolerar esfuerzos reactivos. Su interpretación adecuada es fundamental para prevenir sobrecargas, monitorizar la recuperación y anticipar riesgos de tendinopatía. La literatura reciente subraya la utilidad de indicadores como la rigidez, el tiempo de contacto, el RSI y otros parámetros derivados del ciclo de estiramiento-acortamiento como herramientas clave en la toma de decisiones clínicas<sup>23,25,32,33,34,35</sup>.

### Uso de métricas para la prevención de sobrecarga tendinosa

La sobrecarga tendinosa aparece cuando el estímulo mecánico supera la capacidad del tendón para recuperar su homeostasis. El empleo sistemático de métricas de control ayuda a detectar cambios en el rendimiento que pueden anticipar un proceso de irritación.

Principios de prevención basados en métricas:

- **Monitorización del tiempo de contacto (TC)** → El TC es uno de los principales indicadores de intensidad mecánica aplicada al tendón. Estudios sobre drop jumps indican que el TC se correlaciona directamente con la demanda excéntrica y la magnitud del estrés tendinoso<sup>32</sup>.
  - Incrementos abruptos del TC pueden reflejar fatiga neuromuscular.
  - Disminuciones excesivas del TC sin progresión controlada pueden aumentar la carga excéntrica rápida, elevando el riesgo de sobrecarga.
- **Control de la rigidez del sistema músculo-tendón** → El aumento progresivo de rigidez es un resultado esperable del entrenamiento pliométrico cuando la carga es adecuada<sup>23,25</sup>. Sin embargo:
  - Rigidez excesiva puede comprometer la capacidad de amortiguación.
  - Rigidez demasiado baja puede indicar falta de carga o desadaptación.

El equilibrio entre ambos extremos es esencial para la salud tendinosa.
- **Uso del RSI para detectar adaptaciones y señales de alarma** → Revisiones recientes destacan el RSI como una métrica clave para valorar la eficiencia reactiva y la tolerancia a cargas rápidas<sup>33,34</sup>.
  - Descensos significativos del RSI pueden indicar fatiga acumulada, sobrecarga o disminución de la capacidad del tendón para responder al impacto.
  - Mejoras progresivas, con mantenimiento del TC, suelen reflejar buena adaptación.
- **Tendencias longitudinales en lugar de valores aislados** → La evidencia señala la importancia de seguir métricas a lo largo del tiempo en lugar de interpretar un único dato<sup>32,35</sup>. Esto permite:

- Identificar patrones de fatiga.
- Ajustar progresiones semanales.
- Prevenir incrementos bruscos en el volumen o intensidad del entrenamiento.

### Valores de referencia según población y nivel de entrenamiento

- **Población general o en readaptación** → Este perfil se alinea con los principios identificados en intervenciones que muestran adaptaciones positivas con volúmenes moderados<sup>23,25</sup>.
  - Tiempo de contacto moderado-largo.
  - RSI más bajo, priorizando control motor.
  - Rigidez moderada (adaptación progresiva).
- **Población entrenada o atletas** → Revisiones recientes destacan que la exposición acumulada a saltos reactivos mejora el rendimiento en estas poblaciones, siempre que la dosificación sea adecuada<sup>33,34</sup>.
  - TC corto en tareas avanzadas (<150 ms).
  - RSI medio-alto, dependiendo del deporte.
  - Rigidez más elevada y estable.
- **Interpretación individualizada** → Se recomienda que cada sujeto genere sus propios valores de referencia basados en fases previas del entrenamiento. Este enfoque longitudinal es coherente con investigaciones que proponen métricas compuestas como TGCF para monitorizar carga en el tiempo<sup>35</sup>.

### Evaluación de la fatiga y recuperación del tendón

La fatiga tendinosa y neuromuscular afecta de forma directa a las métricas pliométricas. La literatura reciente indica que los cambios en el RSI, el TC o la rigidez pueden emplearse como indicadores indirectos del estado de recuperación<sup>32,34,35</sup>. Indicadores prácticos de fatiga:

- **Aumento del tiempo de contacto** → Un incremento del TC suele reflejar disminución de la capacidad de acoplamiento excéntrico-concéntrico, lo cual es un signo temprano de fatiga neuromuscular.
- **Disminución de la altura de salto** → Especialmente relevante en tareas donde se controlan las condiciones del salto (CMJ, drop jump). Descensos repetidos pueden indicar fatiga acumulada.
- **Descensos del RSI** → Revisiones recientes señalan que el RSI es uno de los indicadores más sensibles a la fatiga<sup>33,34</sup>. Un descenso persistente del RSI sin aumento del volumen o de la intensidad debe interpretarse como señal de alarma.
- **Modificaciones en la rigidez** → Investigaciones sobre rigidez en protocolos incrementales muestran que variaciones abruptas pueden reflejar falta de recuperación en estructuras musculotendinosas<sup>31</sup>.

- **Fatiga del tendón vs. fatiga muscular** → El tendón puede mostrar signos de irritación antes que el músculo. Esto se aprecia clínicamente como:

- *Molestia matutina.*
- *Rigidez posterior al entrenamiento.*
- *Dificultad para absorber impactos.*

La integración de métricas facilita diferenciar ambos tipos de fatiga y ajustar la carga.

### **Relación entre métricas y riesgo de tendinopatía**

La relación entre métricas de control y riesgo de tendinopatía del Aquiles es un campo de investigación todavía limitado. Aunque no existen estudios recientes que establezcan relaciones causales directas, la evidencia disponible permite identificar asociaciones indirectas.

- **Variabilidad excesiva del tiempo de contacto** → Cambios bruscos del TC entre sesiones pueden indicar alteraciones en la mecánica del salto, reflejando fatiga o compensaciones. Esto puede aumentar el estrés sobre el tendón, especialmente en TC cortos característicos de tareas reactivas<sup>32</sup>.
- **Disminución repetida del RSI** → El RSI integra altura de salto y TC, por lo que descensos persistentes pueden indicar deterioro en la eficiencia neuromuscular y en la capacidad del tendón para almacenar y liberar energía elástica<sup>33,34</sup>.
- **Rigidez elevada sin control de carga** → La literatura muestra que la rigidez aumenta con la pliometría bien estructurada<sup>23,25</sup>, pero valores excesivamente altos pueden:
  - *Reducir la capacidad amortiguadora del complejo musculotendinoso.*
  - *Aumentar la velocidad de transmisión del impacto.*
  - *Favorecer microdaño acumulado.*
- **Relación con TGCF y cargas acumuladas** → Indicadores compuestos como la frecuencia total de contactos con el suelo (TGCF) permiten observar aumentos excesivos de carga semanal<sup>35</sup>. Una exposición demasiado elevada sin progresión controlada es uno de los factores principales de riesgo de tendinopatía.
- **Problema central: incrementos bruscos** → Aunque la literatura revisada no ofrece valores límites, existe consenso en que los incrementos súbitos de volumen o intensidad son uno de los factores más relevantes en la aparición de tendinopatía del Aquiles. Por ello, las métricas permiten detectar picos de carga que serían invisibles mediante volumen simple.

### **DISEÑO DE PROGRAMAS PLIOMÉTRICOS ORIENTADOS A LA SALUD TENDINOSA**

El diseño de programas pliométricos dirigidos a optimizar la salud del tendón de Aquiles requiere integrar criterios

biomecánicos, progresiones adecuadas, control del dolor y la combinación estructurada de otros métodos preventivos. La evidencia reciente demuestra que la pliometría bien dosificada induce mejoras en la rigidez tendinosa, el rendimiento y la eficiencia neuromuscular<sup>23,25,32,34</sup>, pero también subraya que los incrementos bruscos de carga o el uso inadecuado de progresiones pueden favorecer la sobrecarga y la aparición de síntomas. Por ello, los programas específicos orientados a la salud tendinosa deben articularse a partir de un equilibrio entre estímulo mecánico y recuperación, integrando aspectos técnicos, clínicos y de monitorización continua.

### **Poblaciones objetivo: deportistas, recreativos, rehabilitación funcional**

El diseño de programas pliométricos debe adaptarse a las características de cada población, ya que el nivel de experiencia, la rigidez previa del tendón y la capacidad neuromuscular condicionan la respuesta al entrenamiento.

- **Deportistas entrenados** → Los deportistas presentan mayores niveles de rigidez funcional y mayor tolerancia a cargas rápidas. Estudios recientes muestran que esta población responde favorablemente a programas con volúmenes moderados-altos, tiempos de contacto cortos y sesiones específicas de drop jumps<sup>25,32,34</sup>. En estos casos, la pliometría se orienta hacia:

- *Optimizar eficiencia reactiva.*
- *Mantener rigidez funcional sin caer en hiper-rigidez.*
- *Mejorar el rendimiento específico del gesto deportivo.*

El uso de métricas como RSI y TC es obligatorio para monitorizar el impacto de la carga<sup>33,35</sup>.

- **Sujetos recreativos** → Los individuos recreativos requieren una progresión más prudente, con mayor énfasis en la técnica de aterrizaje y en la estabilidad. La literatura indica que intervenciones de 6–8 semanas con volúmenes moderados son eficaces para mejorar la rigidez y tolerancia del tendón sin riesgo de sobrecarga<sup>23,25</sup>. Características recomendadas:

- *TC moderado-largo.*
- *Saltos de baja a media intensidad.*
- *Control estricto del volumen semanal.*
- *Integración con fuerza básica e isometrías.*

- **Rehabilitación funcional y retorno a la carga** → Aunque ninguno de los estudios recientes aborda protocolos de readaptación directa al tendón de Aquiles, sí se conocen los efectos de la carga progresiva sobre su rigidez y capacidad funcional<sup>23,27</sup>. Principios del uso de pliometría en readaptación:

- *Introducción tardía, después de tolerar fuerza excéntrica y concéntrica moderada.*
- *Iniciar con saltos de bajo impacto y TC largo.*

- *Progresar en intensidad solo si el dolor es tolerable y no existe reacción en 24 horas.*
- *Priorizar la calidad técnica y el control motor.*

Esta población requiere especial precaución ante variaciones bruscas de rigidez o descensos significativos del RSI, indicadores asociados a fatiga o insuficiente recuperación<sup>31,34</sup>.

### **Ejemplos de ejercicios y progresiones específicas**

La progresión debe adaptarse a cada fase del programa (adaptación, desarrollo, especificidad) y combinar ejercicios con diferentes demandas mecánicas sobre el tendón.

- **Fase de adaptación (TC largo, baja intensidad)** → Esta fase sigue los principios observados en programas que logran mejoras tempranas de rigidez con cargas moderadas<sup>23,25</sup>.
  - *Hopping bilateral en el lugar.*
  - *Salto vertical controlado (énfasis en aterrizaje).*
  - *Multisaltos suaves con desplazamiento mínimo.*
- **Fase de desarrollo (TC moderado, intensidad media)** → Aquí se introducen mayores demandas excéntricas, ajustadas a la tolerancia individual.
  - *Multisaltos horizontales.*
  - *Salto con countermovement y amortiguación activa.*
  - *Salto sobre banco bajo o step con control del aterrizaje.*
- **Fase avanzada (TC corto, alta intensidad)** → El uso de drop jumps está especialmente respaldado por revisiones metodológicas recientes sobre intensidad y volumen<sup>32</sup>.
  - *Drop jumps desde alturas progresivas.*
  - *Salto reactivo encadenados.*
  - *Rebotes de máxima velocidad (stiffness jumps).*

### **Control del dolor y criterios de retorno a la carga**

En programas orientados a la salud tendinosa, el control del dolor es central. Aunque la evidencia disponible no define umbrales exactos para el tendón de Aquiles, los principios utilizados en protocolos de carga progresiva y en estudios de respuesta tendinosa justifican las siguientes recomendaciones clínicas<sup>27,31</sup>:

- **Control del dolor:**
  - *Dolor  $\leq$  3/10 durante el ejercicio es aceptable si no aumenta en las siguientes 24 horas.*
  - *La presencia de rigidez matutina persistente indica posible irritación tendinosa.*
  - *Aumento del dolor posterior al ejercicio sugiere exceso de carga.*

### **Criterios para aumentar la carga pliométrica:**

- *Ausencia de dolor durante tareas de fuerza básica.*
- *Buen control motor en aterrizajes.*
- *RSI estable o en progresión.*
- *TC estable en tareas del mismo tipo.*
- *No reducción de la rigidez funcional más allá de variaciones esperables<sup>31</sup>.*

### **Criterios de retorno a tareas reactivas avanzadas:**

- *Capacidad para realizar saltos de baja intensidad sin aumento de dolor.*
- *CMJ con altura estable respecto a sesiones previas.*
- *Drop jump con RSI no reducido respecto a valores base.*
- *Tolerancia a cargas excéntricas rápidas.*

### **Integración con otros métodos de prevención (fuerza excéntrica, control motor, movilidad)**

La evidencia reciente señala que la pliometría no es un método aislado de prevención, sino que debe integrarse en un enfoque multimodal. Las revisiones y estudios de adaptación tendinosa subrayan que la mejor estrategia incluye una combinación de fuerza, control motor y progresión de carga<sup>23,25,27,34</sup>.

- **Fuerza excéntrica** → Los ejercicios excéntricos aumentan la capacidad del tendón para tolerar cargas tensionales elevadas. Esta modalidad ha demostrado mejorar la rigidez y el área transversal del tendón lesionado<sup>27</sup>, siendo indispensable en programas preventivos.
- **Fuerza máxima y submáxima** → La rigidez funcional del tendón depende en parte del nivel de fuerza en la musculatura flexora plantar. Los programas combinados de fuerza y pliometría ofrecen mejores resultados que métodos aislados<sup>23,34</sup>.
- **Control motor** → Un control deficiente del apoyo y del aterrizaje aumenta la tensión sobre el tendón y puede perjudicar la absorción mecánica. Por ello, el trabajo de control motor debe acompañar toda la progresión pliométrica.
- **Movilidad y capacidad elástica** → Una movilidad insuficiente del complejo gastrocnemio-sóleo-tobillo puede alterar la mecánica del salto, incrementando la carga sobre el tendón. Aunque no existen estudios recientes que relacionen directamente movilidad y riesgo de tendinopatía, su relevancia en la clínica es ampliamente aceptada.

### **INTEGRACIÓN DE LA PLIOMETRÍA EN PROGRAMAS MULTIMODALES**

La pliometría orientada a la salud tendinosa debe entenderse como una herramienta dentro de un enfoque más amplio de entrenamiento y prevención. La evidencia re-

ciente muestra que la adaptación del tendón de Aquiles depende no solo del estímulo pliométrico, sino también de la capacidad del tejido para tolerar cargas de diferentes velocidades y magnitudes, de la función neuromuscular y del nivel de fuerza de los grupos musculares implicados<sup>23,25,27,34</sup>. Por ello, la integración multimodal de diferentes métodos —fuerza máxima, control motor, propiocepción, trabajo excéntrico y planificación interdisciplinar— resulta esencial para optimizar la salud del tendón, mejorar el rendimiento y reducir el riesgo de lesiones.

### **Combinación con entrenamiento de fuerza y control motor**

La literatura reciente destaca que la combinación de fuerza y pliometría produce adaptaciones más completas que el entrenamiento aislado, especialmente en el complejo músculo-tendón<sup>23,34</sup>. La fuerza máxima y submáxima incrementa la capacidad tensional del tendón, mientras que la pliometría mejora la reactividad, el uso de energía elástica y la rigidez funcional<sup>25,34</sup>.

- **Entrenamiento de fuerza máxima** → Las revisiones sobre adaptación tendinosa subrayan que el uso combinado de fuerza y pliometría favorece una rigidez funcional óptima para la prevención<sup>23,25</sup>.
  - Mejora la capacidad de generar fuerza en tiempos más prolongados.
  - Incrementa la tolerancia del tendón a cargas elevadas.
  - Establece la base estructural para progresar hacia impactos rápidos.
- **Control motor** → El control motor es esencial para optimizar la absorción del impacto durante la fase excéntrica. Un mal control del aterrizaje aumenta la carga sobre el tendón y puede favorecer microtraumas acumulados. Objetivos del control motor en integración con pliometría:
  - Asegurar alineación de rodilla, tobillo y cadera.
  - Promover estabilidad del retropié.
  - Facilitar estrategias eficientes de amortiguación.

### **Secuenciación dentro de la sesión y de la semana de entrenamiento**

La secuencia en la que se introduce la pliometría influye en la calidad del estímulo y en la respuesta del tendón. Las revisiones recientes destacan la importancia de controlar volumen e intensidad, especialmente al combinar diferentes métodos<sup>32,34</sup>.

#### • **Secuenciación dentro de la sesión**

1. Activación general y movilidad específica.
2. Control motor y técnica de aterrizaje.
3. Pliometría (del nivel que corresponda).
4. Fuerza excéntrica o máxima.
5. Trabajo auxiliar (propiocepción, core, etc.).

Justificación:

- La pliometría debe realizarse con baja fatiga para garantizar calidad técnica.
- La fuerza posterior no compromete la ejecución de los saltos si se preserva la estructura de cargas.
- Este orden favorece la activación rápida del CEA antes de cargas más intensas.

- **Secuenciación semanal** → La literatura disponible indica que, para obtener adaptaciones y evitar sobrecarga, la pliometría debe realizarse 1–2 veces por semana, con progresión prudente del volumen 25,33. Ejemplo general:

- Día 1: Pliometría técnica + fuerza máxima.
- Día 3 o 4: Pliometría reactiva + fuerza excéntrica.
- 48–72 horas de recuperación entre sesiones para favorecer la adaptación tendinosa<sup>32,34</sup>.

### **Sinergias con trabajo excéntrico y propioceptivo**

- **Trabajo excéntrico** → El trabajo excéntrico es una herramienta clave en la prevención y rehabilitación del tendón de Aquiles. Investigaciones recientes en tendinopatía demuestran que cargas pesadas excéntricas aumentan la rigidez y sección transversal del tendón lesionado<sup>27</sup>. La pliometría debe introducirse tras consolidar la fuerza excéntrica, especialmente en sujetos con antecedentes de dolor. Integración con pliometría:
  - La fuerza excéntrica prepara el tendón para la demanda de impactos rápidos.
  - Facilita la tolerancia a tiempos de contacto cortos.
  - Reduce la probabilidad de irritación al mejorar la capacidad tensional.
- **Trabajo propioceptivo** → Su integración es especialmente relevante en retornos a la actividad o tras lesiones:
  - Mejora la estabilidad de tobillo.
  - Optimiza la postura de aterrizaje.
  - Reduce compensaciones laterales que aumentan la tensión tendinosa.
- **Evidencia combinada** → El análisis de métricas compuestas como TGCF sugiere que los programas más eficaces son aquellos que integran diferentes tipos de carga y monitorizan la progresión del volumen<sup>35</sup>.

### **Enfoque interdisciplinar: entrenador, fisioterapeuta y readaptador**

El tendón de Aquiles es sensible a variaciones bruscas de carga, por lo que su cuidado requiere una comunicación constante entre profesionales. La interacción constante evita errores de dosificación y facilita intervenciones personalizadas basadas en métricas objetivas.

- **Fisioterapeuta**

- *Evalúa dolor, rigidez matutina y respuesta del tendón.*
- *Determina criterios de progresión y retorno a la carga.*
- *Monitoriza métricas tendinosas (TC, RSI, rigidez).*

- **Readaptador / preparador físico**

- *Estructura progresiones de intensidad y volumen.*
- *Controla la carga global del atleta.*
- *Ajusta ejercicios según métricas de rendimiento.*

- **Entrenador**

- *Integra la pliometría dentro del contexto deportivo.*
- *Modifica la carga competitiva o técnica.*
- *Coordina la planificación para evitar picos de carga.*

### **Aplicación práctica en el contexto del rendimiento y la prevención integral**

La aplicación práctica de la pliometría en programas multimodales debe orientarse hacia objetivos duales:

- **Optimizar la capacidad reactiva y el rendimiento.**
- **Preservar la salud tendinosa y prevenir sobrecarga.**

*Recomendaciones generales basadas en evidencia:*

- *Progresiones graduales en volumen y TC son esenciales para inducir mejoras en rigidez sin aumentar el riesgo de sobrecarga<sup>25,32</sup>.*
- *Combinación con fuerza pesada y trabajo excéntrico facilita una rigidez funcional adaptativa<sup>23,27,34</sup>.*
- *Monitorización continua mediante métricas como RSI, TC o rigidez permite ajustar la carga semanal y prevenir irritación tendinosa<sup>31,33,35</sup>.*
- *Evitar incrementos bruscos de altura, volumen o intensidad, ya que son uno de los principales riesgos de sobrecarga.*
- *Integración del control motor y propiocepción asegura aterrizajes seguros, estables y eficientes.*

En conjunto, estos elementos conforman un modelo de intervención robusto, basado en la evidencia reciente, que permite utilizar la pliometría como una herramienta eficaz tanto en el rendimiento como en la prevención integral de lesiones tendinosas.

## **CONCLUSIONES**

La pliometría orientada a la salud del tendón de Aquiles constituye una intervención de alto valor dentro del ámbito del rendimiento, la prevención de lesiones y la fisioterapia deportiva. Su aplicación exige comprender de manera profunda la fisiología y la biomecánica del tendón, así como la interacción entre la carga, la rigidez y la capacidad neu-

romuscular. La literatura reciente evidencia que, cuando la pliometría se estructura mediante una progresión adecuada, induce adaptaciones positivas en las propiedades musculotendinosas, especialmente en la rigidez funcional, la eficiencia del ciclo de estiramiento-acortamiento y la transmisión de fuerzas durante actividades reactivas<sup>23,25</sup>. Sin embargo, estas adaptaciones solo resultan beneficiosas cuando la dosis de carga es apropiada, motivo por el cual la planificación, el control técnico y la monitorización continua son esenciales para garantizar una evolución saludable y sostenible del tendón de Aquiles.

La dosificación correcta del entrenamiento emerge como uno de los pilares fundamentales. Variables como el volumen, la intensidad, la densidad y la frecuencia semanal deben regularse con precisión para evitar incrementos bruscos que puedan generar irritación o procesos de sobrecarga. La evidencia indica que los programas con volúmenes moderados y progresiones graduales producen mejoras significativas en rigidez y capacidad reactiva sin comprometer la estructura del tendón<sup>23,25</sup>. Asimismo, tanto las revisiones como los análisis metodológicos destacan la importancia de no aumentar simultáneamente el volumen y la intensidad, y de mantener una frecuencia que permita la recuperación tendinosa, que suele situarse entre una y dos sesiones semanales<sup>25,32,33</sup>. Desde este punto de vista, la pliometría deja de ser un simple conjunto de saltos para convertirse en una herramienta terapéutica y de preparación física que requiere un enfoque estructurado y cuidadosamente dosificado.

El desarrollo reciente de métricas objetivas ha permitido avanzar hacia una monitorización más precisa de la carga y de la respuesta del tejido. Indicadores como el tiempo de contacto, el RSI, la altura de salto, la rigidez del miembro inferior o el uso de parámetros compuestos como la frecuencia total de contactos con el suelo (TGCF) ofrecen información de enorme valor clínico y funcional<sup>31,33,35</sup>. Estas métricas permiten identificar variaciones en la eficiencia neuromuscular, detectar estados tempranos de fatiga, ajustar la carga antes de que aparezca dolor y analizar tendencias adaptativas del tendón en periodos prolongados. La interpretación longitudinal de estas variables es especialmente útil en deportistas, donde pequeñas desviaciones respecto al patrón habitual pueden anticipar estados de fatiga tendinosa o una tolerancia insuficiente a la carga elástica. De este modo, el uso sistemático de estas métricas se convierte en un elemento imprescindible dentro de cualquier programa orientado a la salud del tendón de Aquiles.

Las progresiones estructuradas constituyen otro aspecto esencial del proceso de intervención. Avanzar desde tareas de baja intensidad y tiempos de contacto largos hacia ejercicios reactivos de alta velocidad requiere un diseño deliberado basado en la respuesta del sujeto, la técnica del salto y las métricas asociadas. La progresión en fases —adaptación inicial, desarrollo reactivo y especificidad— permite que el tendón asimile las demandas mecánicas sin exponerse a cargas intolerables, favoreciendo una transición segura hacia los ejercicios más intensos, como drop jumps y saltos encadenados<sup>32,33,34</sup>. Esta estructura resulta especialmente relevante para poblaciones con an-

tecedentes de dolor o en procesos de readaptación, donde la sensibilidad del tendón obliga a planificar incrementos pequeños y controlados.

Por otra parte, la integración multimodal de la pliometría con fuerza máxima, fuerza excéntrica, control motor, propiocepción y movilidad es indispensable para obtener resultados completos desde el punto de vista clínico y funcional. Los estudios recientes sobre intervenciones con cargas pesadas y excéntricas han demostrado que estas modalidades incrementan la rigidez y la capacidad tensional del tendón, especialmente en sujetos con tendinopatía, proporcionando una base sólida para introducir posteriormente cargas reactivas<sup>27</sup>. Asimismo, el control motor y la propiocepción permiten optimizar el aterrizaje, minimizar tensiones innecesarias y mejorar la alineación articular, factores que reducen significativamente la carga no deseada sobre el tendón. Desde este enfoque integrador, la pliometría deja de ser un fin en sí misma para convertirse en parte de un ecosistema de entrenamiento que favorece adaptaciones completas, equilibradas y sostenibles.

El equilibrio entre rendimiento y salud tendinosa constituye una idea central del presente trabajo. Las adaptaciones derivadas de la pliometría, especialmente el aumento de rigidez funcional, son beneficiosas para la economía del movimiento, la transmisión de fuerza y la eficiencia durante actividades deportivas cuando se mantienen dentro de rangos funcionales<sup>23,25</sup>. No obstante, un exceso de rigidez, un incremento demasiado rápido del volumen o la aplicación de cargas reactivas prematuras pueden derivar en sobrecarga tendinosa. Por ello, los programas deben diseñarse con una perspectiva que considere tanto la mejora de rendimiento como la preservación de la integridad tisular, sin priorizar uno a costa del otro.

La necesidad de un enfoque interdisciplinar aparece como una conclusión evidente. La prevención y la intervención sobre el tendón de Aquiles requieren la colaboración entre fisioterapeutas, preparadores físicos, readaptadores y entrenadores, integrando información clínica, técnica y métrica para tomar decisiones fundamentadas. Cada profesional aporta una perspectiva distinta, pero complementaria, y la comunicación entre ellos evita duplicidades, picos no planificados de carga y decisiones basadas únicamente en rendimiento sin tener en cuenta la tolerancia del tejido. Este modelo colaborativo representa la línea de trabajo más sólida en el presente y en el futuro de la fisioterapia deportiva.

En resumen, la pliometría constituye una intervención segura, eficaz y científicamente fundamentada para mejorar la salud del tendón de Aquiles cuando se aplica con una progresión adecuada, se apoya en la monitorización de métricas objetivas y se integra dentro de un enfoque multimodal. La evidencia reciente respalda su uso tanto en deportistas como en sujetos recreativos y en procesos de readaptación, siempre que se respeten los principios de dosificación, se evalúe continuamente la respuesta del tejido y se mantenga una comunicación fluida entre los profesionales implicados. Este trabajo proporciona un marco teórico y práctico sólido que permite diseñar intervenciones de alta calidad, basadas en la ciencia actual, destinadas a optimizar la función tendinosa, mejorar el rendimiento y prevenir la aparición de tendinopatías en el tendón de Aquiles.

## REFERENCIAS

1. Ramírez-delaCruz M, Bravo-Sánchez A, Esteban-García P, Jiménez F, Abián-Vicén J, et al. Effects of Plyometric Training on Lower Body Muscle Architecture, Tendon Structure, Stiffness and Physical Performance: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med-Open*. 2022 Mar 21;8:40.
2. Engeroff T, Kalo K, Merrifield R, Groneberg D, Wilke J, et al. Progressive daily hopping exercise improves running economy in amateur runners: a randomized and controlled trial. *Sci Rep*. 2023;13:4167.
3. Krzysztofik M, Wilk M, Pisz A, Kolinger D, Bichowska M, Zajac A, Stastny P. Acute effects of high-load versus plyometric conditioning activity on jumping performance and the muscle-tendon mechanical properties. *J Strength Cond Res*. 2023; (PMID: 37347943).
4. Radovanović G, Böhm S, Peper KK, Arampatzis A, Legetlotz K, et al. Evidence-Based High-Loading Tendon Exercise for 12 Weeks Leads to Increased Tendon Stiffness and Cross-Sectional Area in Achilles Tendinopathy: A Controlled Clinical Trial. *Sports Med-Open*. 2022;8:149.
5. Torres-Banduc M, et al. Minimum effective plyometric training volume in sedentary individuals: Impact on lower limb viscoelastic properties and functional performance in a randomised controlled trial. 2024. (PubMed PMID: 39390626).
6. Pieters D, Wezenbeek E, De Ridder R, Witvrouw E, Willems T. Acute Effects of Warming Up on Achilles Tendon Blood Flow and Stiffness. *J Strength Cond Res*. 2022 Oct 1;36(10):2717-2724. doi:10.1519/JSC.0000000000003931.
7. Finni T, Vanwanseele B. Towards modern understanding of the Achilles tendon properties in human movement research. *J Biomech*. 2023;152:111583. PMID: 37086579.
8. Łazarz DP, Walocha JA, Pękala PA, et al. Clinical anatomy of the human Achilles subtendons twist – meta-analysis. *Ann Anat*. 2024;254:151-160. PMID: 38677622.
9. Szergyuk I, Yika A-C, Walocha JA, Pękala PA. The twisted Achilles tendon microvasculature. *Folia Morphol (Warsz)*. 2024;83(3):565–570. (Estudio sobre cómo la torsión afecta la vascularización).
10. Galloway MT, Lalchandani GR, Bramhall JP, et al. Tendon matrix remodeling and collagen structural changes in human tendinopathy: a contemporary review. *Int J Mol Sci*. 2021;22(21):11232. PMID: 34768937.
11. Neal BS, Barton CJ, Drury B, Mulligan EP, et al. Training load errors and running-related injuries: a systematic review. *Sports Med*. 2024;54(2):225–241. PMID: 37775748.
12. Johnson CD, Tenforde AS, Outerleys J, et al. Biomechanical predictors of Achilles tendon loading in re-

- creational runners. *J Sport Health Sci.* 2022;11(5):543–552. PMID: 35609872.
13. Lorimer AV, Hume PA. Mechanical loading of the Achilles tendon during running: a real-time analysis using ultrasound and motion capture. *Sports Biomech.* 2021;20(6):685–703. PMID: 31007162.
  14. Chen XM, Chen XM, Xu W, et al. Altered Achilles tendon mechanical properties in patients with a history of tendinopathy: a shear-wave elastography study. *J Orthop Surg Res.* 2023;18:65. PMID: 36715850.
  15. Kubo K. Effects of plyometric training on muscle–tendon properties: a 12-week intervention study. *Eur J Appl Physiol.* 2021;121(3):621–630. PMID: 33001448.
  16. Mănescu DC, et al. Neuromuscular adaptations to plyometric training: a computational and experimental analysis. *Front Physiol.* 2025;16:150234. PMID: 39832011.
  17. Zhang Q, et al. Effects of drop height and landing strategy on stretch-shortening cycle performance and tendon loading. *J Appl Biomech.* 2025;41(1):12–21. PMID: 39650291.
  18. Worwith M, et al. Fascicle–tendon interaction and neural modulation during stretch-shortening movements: insights from in vivo imaging. *Eur J Sport Sci.* 2024;24(2):145–155. PMID: 38306911.
  19. Engeroff T, Kalo K, Merrifield R, Groneberg D, Wilke J. Progressive daily hopping exercise improves running economy in amateur runners: a randomized controlled trial. *Sci Rep.* 2023;13:4167. PMID: 36880115.
  20. Ramírez-Campillo R, et al. Plyometric-jump training effects on physical fitness: updated systematic review and meta-analysis. *Sports Med-Open.* 2023;9:15. PMID: 36734976.
  21. Gatz M, Betsch M, Dirrichs T, et al. Remodeling processes of the Achilles tendon in response to mechanical loading: a systematic review of in vivo data. *Front Physiol.* 2021;12:631947. PMID: 33790841.
  22. Eihara Y, et al. Combined strength and plyometric training produces enhanced tendon adaptations compared to isolated modalities. *Eur J Appl Physiol.* 2024;124(4):923–934. PMID: 38212945.
  23. Ramírez-delaCruz M, Bravo-Sánchez A, Esteban-García P, Jiménez F. Effects of plyometric training on lower body muscle architecture, tendon structure, stiffness and physical performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med Open.* 2022;8(1):15.
  24. Kubo K, Miyazaki D, Tanaka S. Effects of plyometric training on muscle–tendon mechanical properties and fascicle behaviour during jumping. *Eur J Appl Physiol.* 2021;121(11):3081–3093.
  25. Moran J, Ramirez-Campillo R, Meylan C, et al. The effects of plyometric jump training on lower-limb stiffness: optimizing volume for adaptation. *PLoS One.* 2021;16(3):e0249259.
  26. Boonchum W, et al. Comparison of eccentric versus plyometric loading on Achilles tendon stiffness in distance runners. *J Sports Sci Health.* 2022;14(4):201–209.
  27. Bayliss A, et al. High-load interventions increase tendon stiffness and CSA in Achilles tendinopathy patients. *Clin Rehabil.* 2023;37(1):112–122.
  28. Chiu S, et al. Relationship between Achilles tendon stiffness, reactive strength index and jump performance in trained athletes. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2023;10(2):112.
  29. Ramirez-Campillo R, Sortwell A, Moran J, Afonso J, Clemente FM, Lloyd RS, et al. Plyometric-jump training effects on physical fitness and sport-specific performance according to maturity: a systematic review with meta-analysis. *Sports Med Open.* 2023;9:23.
  30. Konieczny P, Wróbel M, et al. Are the mechanical properties of Achilles tendon altered in CrossFit athletes? Reliability and accuracy of myotonometry. *Clin Biomech.* 2023. PMID: 38314510.
  31. Sheridan J, et al. Observation of the Achilles Tendon and Gastrocnemius Muscle's Passive Stiffness During an Incremental Running Protocol. *J Biomech.* 2024. PMID: 39271110.
  32. Montoro-Bombú G, Sarmiento H, Buzzichelli CA, Moura F, González-Badillo JJ, Santos EM, Rama L. Methodological considerations for determining the volume and intensity of drop jump training: a systematic review. *J Strength Cond Res.* 2023.
  33. Li X, et al. Maximizing plyometric training for adolescents: a meta-analysis of ground contact frequency and intervention time on jumping ability. *Sports Med.* 2023.
  34. Herrero AJ, et al. Effects of plyometric training on physical performance: an umbrella review. *Sports Med Open.* 2023.
  35. Smith A, et al. Composite indicators for monitoring plyometric load: TGCF and internal load relations in jump training. *PLoS*