

Módulo 2. Optimización del rendimiento deportivo con datos fisiológicos

Unidad 1. Análisis y mejora del rendimiento

Durante décadas, el entrenamiento deportivo se basó fundamentalmente en la experiencia de los entrenadores, la intuición del cuerpo técnico y la percepción subjetiva del atleta. Aunque este enfoque sigue teniendo un valor indiscutible, la aparición de tecnologías de medición fisiológica, análisis computacional y recopilación masiva de datos ha transformado radicalmente el modo en que se concibe y se gestiona el rendimiento deportivo.

En la actualidad, el conocimiento profundo de las respuestas fisiológicas del cuerpo humano frente al esfuerzo, el descanso y la carga acumulada permite personalizar y ajustar las estrategias de entrenamiento con un nivel de precisión sin precedentes. Los datos ya no son un complemento, sino el núcleo de muchas decisiones clave en el ámbito del alto rendimiento.

A continuación, se explora el uso de datos fisiológicos como herramienta fundamental para la mejora del rendimiento y los procesos de recuperación. En particular, se analizan dos grandes ejes: (1) la identificación de patrones y tendencias fisiológicas que permitan anticiparse a estados de forma o de fatiga, y (2) la utilización de herramientas de *analytics* y *big data* para interpretar y aplicar esa información de manera significativa.

Identificación de patrones y tendencias fisiológicas

El cuerpo humano expresa su estado interno a través de señales fisiológicas. Algunas de estas señales son visibles, como la respiración agitada, el sudor o el enrojecimiento; sin embargo, muchas otras requieren medición especializada: frecuencia cardíaca, presión arterial, temperatura corporal, lactato en sangre, niveles de cortisol, concentración de oxígeno, conductancia de la piel, entre otras. Al medir estas variables de forma continua o periódica, es posible construir una «huella fisiológica» única de cada atleta.

El seguimiento de estas variables a lo largo del tiempo permite identificar patrones recurrentes. Por ejemplo:



- un aumento progresivo en la frecuencia cardíaca en reposo puede anticipar estados de sobreentrenamiento;
- la disminución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) suele indicar una mala recuperación o un estado de estrés crónico;
- la disminución de la eficiencia en el consumo de oxígeno (VO_2 máx.) puede señalar pérdida de forma física o presencia de una enfermedad incipiente;
- el aumento de los niveles de lactato a menores intensidades de esfuerzo puede revelar una deficiencia en la adaptación metabólica.

Estos patrones, cuando se contextualizan adecuadamente, permiten no solo evaluar el estado actual del atleta, sino también proyectar su evolución, anticipar puntos de inflexión y prevenir situaciones de riesgo fisiológico. Estos análisis pueden realizarse mediante el análisis longitudinal —como se ha visto en capítulos anteriores—, que consiste en la evaluación de un conjunto de variables fisiológicas durante un período prolongado.

En este enfoque, la clave no está solo en los valores absolutos, sino en su evolución. Un atleta puede tener un VO_2 máx. más bajo que otro, pero si muestra una mejora sostenida, podría estar en una trayectoria de crecimiento más favorable. Este análisis puede enriquecerse con métodos estadísticos básicos, como la media, la desviación estándar o las regresiones, así como con técnicas más complejas de minería de datos, aprendizaje automático y análisis multivariable.

Entre los enfoques útiles se encuentran los siguientes:

- **Modelos de series temporales.** Permiten detectar patrones estacionales o cíclicos en la condición física.
- **Clustering (agrupamiento):** este método es útil para identificar subgrupos de sesiones de entrenamiento que generan respuestas fisiológicas similares.
- **Análisis de componentes principales (PCA):** permite reducir la complejidad de los datos y detectar variables clave.
- **Detección de anomalías:** señala momentos en que un dato se aleja significativamente de la norma y puede indicar una señal de alerta.

En paralelo, el análisis comparativo permite evaluar a un atleta en relación con una base de datos más amplia, ya sea de su mismo equipo, categoría o nivel competitivo. Este tipo de análisis puede revelar si el deportista se encuentra por encima, en la media o por debajo de ciertos estándares fisiológicos esperados.



La principal ventaja de detectar patrones fisiológicos consiste en la posibilidad de adaptar el entrenamiento a las características específicas del atleta. En lugar de aplicar programas genéricos, es posible diseñar una planificación verdaderamente personalizada. Así, por ejemplo, un atleta con recuperación lenta del sistema nervioso central requerirá descansos más prolongados entre sesiones de alta intensidad; en cambio, un deportista con alta eficiencia metabólica podrá beneficiarse de entrenamientos prolongados a baja intensidad para potenciar su resistencia aeróbica, mientras que otro con alta tolerancia al lactato estará en condiciones de trabajar más cerca de los umbrales anaeróbicos y optimizar su rendimiento en deportes de corta duración.

Además, el conocimiento de los patrones fisiológicos puede ayudar a programar las fases de carga y descarga, periodos de concentración y *tapering*, y los momentos ideales para introducir nuevas cargas o competir.

Uso de *analytics* y *big data* en el deporte

El término *big data* se refiere a la capacidad de recopilar, almacenar y analizar grandes volúmenes de datos que, por su tamaño y complejidad, no pueden ser tratados con herramientas convencionales. En el contexto deportivo, esta revolución ha sido impulsada por el desarrollo de dispositivos portátiles, sensores de alta precisión, plataformas en la nube y algoritmos avanzados de procesamiento.

Hoy en día, un simple entrenamiento puede generar millones de puntos de datos: desde la velocidad, el ritmo cardíaco y la potencia aplicada, hasta la calidad del sueño la noche anterior, el nivel de hidratación y el estado emocional previo a la sesión. Toda esta información, si se integra correctamente, permite tomar decisiones más rápidas, más acertadas y más individualizadas.

Las principales fuentes de datos fisiológicos en el deporte son las siguientes:

- **Dispositivos portátiles (*wearables*).** Relojes deportivos, bandas de frecuencia cardíaca, sensores de movimiento, oxímetros.
- **Pruebas de laboratorio:** espirometrías, *test* de esfuerzo, análisis de lactato, estudios de composición corporal.
- **Plataformas digitales:** *apps* de entrenamiento, diarios de sueño, cuestionarios de bienestar subjetivo, registros de nutrición.
- **Modelos predictivos basados en IA:** estos modelos correlacionan datos fisiológicos con resultados esperados.

La riqueza de estos datos depende no solo de su volumen, sino también de su calidad, frecuencia de recolección y contexto. No es lo mismo registrar una frecuencia cardíaca



aislada que hacerlo de forma continua durante un entrenamiento, considerando factores como la temperatura ambiente, la altitud o el nivel de estrés emocional.

Los sistemas de *analytics* permiten dar sentido a los datos. Se trata de plataformas (como Smartabase, Kitman Labs, STATSports, Whoop, entre otras) que recolectan, procesan y visualizan la información fisiológica de forma estructurada. A continuación, se detallan sus principales funciones:

- **Monitoreo en tiempo real.** Seguimiento del estado del deportista durante entrenamientos o competiciones.
- **Análisis retrospectivo.** Identificación de patrones, correlaciones y momentos críticos a partir de datos históricos.
- **Alertas inteligentes.** Detección de desviaciones significativas que advierten sobre posibles riesgos, como signos de fatiga acumulada.
- **Visualización intuitiva.** Presentación de datos mediante gráficos, tableros y reportes accesibles para entrenadores, médicos y deportistas.

En muchos casos, estos sistemas integran datos fisiológicos con métricas de rendimiento técnico-táctico, aspectos psicológicos y variables externas (como el calendario competitivo), generando una visión integral del estado del atleta.

Una de las grandes promesas de la era digital es el uso de algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) para anticipar el comportamiento fisiológico y el rendimiento futuro. Estos algoritmos se «entrenan» con grandes volúmenes de datos y aprenden a identificar patrones complejos que escapan al análisis humano. Aplicaciones actuales de la inteligencia artificial en el análisis fisiológico incluyen:

- predicción de la fatiga muscular o cardiovascular;
- anticipación de lesiones por sobreuso;
- estimación de tiempos de recuperación individualizados;
- recomendación automática de cargas óptimas de entrenamiento;
- análisis del impacto fisiológico de eventos psicológicos o de viajes largos.

Sin embargo, es importante destacar que ningún modelo, por más sofisticado que sea, puede sustituir la interpretación profesional. Los datos deben ser contextualizados por expertos que comprendan tanto la fisiología humana como la dinámica del deporte en cuestión.

El nuevo rol del equipo técnico y multidisciplinario



El uso eficaz de datos fisiológicos no puede depender únicamente de un científico del deporte o un analista técnico. Requiere un enfoque colaborativo entre entrenadores, preparadores físicos, médicos, fisioterapeutas, nutricionistas, psicólogos deportivos y, por supuesto, los propios deportistas. La interpretación de los datos, la toma de decisiones y la implementación de cambios deben fluir en un entorno de comunicación abierta, continua y basada en la confianza.

En este nuevo paradigma, el entrenador ya no actúa como único decisor, sino como coordinador de una red de conocimiento que incluye a especialistas en distintas disciplinas. La figura del analista de datos, por ejemplo, puede aportar información valiosa sobre cómo responde un jugador a una carga específica, pero es el entrenador quien debe decidir cómo adaptar esa carga al plan general del equipo. El fisioterapeuta puede detectar signos de sobrecarga muscular, pero solo en conjunto con el médico se determinará si es necesario limitar la actividad. Y el atleta, finalmente, debe participar activamente, comprendiendo qué indican sus datos y cómo pueden beneficiar su rendimiento.

Como hemos comentado en otras unidades, este modelo de gestión de datos requiere, por tanto:

- formación transversal del cuerpo técnico;
- plataformas de comunicación comunes;
- flujo eficiente de la información;
- claridad en los roles y responsabilidades;
- compromiso ético con el uso de los datos del deportista.

Es fundamental evitar una tecnocracia del rendimiento en la que las decisiones se tomen de forma automática o deshumanizada en función de algoritmos. El dato debe ser un instrumento que guíe, pero no que sustituya la intuición, la experiencia y el contexto. Por ejemplo, si los datos indican que un jugador ha acumulado una carga fisiológica excesiva, pero el contexto competitivo exige su participación, puede ser legítimo asumir ese riesgo, siempre que sea controlado. Lo mismo ocurre con la recuperación: los parámetros fisiológicos pueden sugerir que un atleta aún no está completamente restablecido, pero si la situación emocional, táctica y personal lo requiere, pueden plantearse alternativas. Este **equilibrio entre datos y criterio humano** es una de las competencias clave en la gestión moderna del rendimiento deportivo.

Monitorización de la recuperación basada en datos fisiológicos



La recuperación es el proceso por el cual el organismo vuelve a su estado de homeostasis tras un esfuerzo físico. Involucra la restauración de los sistemas energéticos, la reparación de tejidos, la reequilibración hormonal y la estabilización del sistema nervioso autónomo. Si este proceso es incompleto o se ve comprometido por cargas sucesivas excesivas, el rendimiento se deteriora y el riesgo de lesión aumenta significativamente. Los datos fisiológicos permiten no solo cuantificar la carga, sino también objetivar el proceso de recuperación. Esto es crucial porque muchas veces el deportista puede sentirse bien subjetivamente, pero su cuerpo no ha completado aún las fases internas de regeneración.

Entre los principales indicadores fisiológicos que permiten evaluar la recuperación, se destacan los siguientes:

- **Variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV).** Uno de los marcadores más sensibles del estado del sistema nervioso autónomo. Un descenso sostenido indica estrés o mala recuperación.
- **Frecuencia cardíaca en reposo:** puede aumentar en situaciones de fatiga crónica, infección, estrés o falta de sueño.
- **Índice de percepción del esfuerzo (RPE):** aunque es subjetivo, cuando se correlaciona con datos fisiológicos puede indicar alteraciones en la respuesta al entrenamiento.
- **Marcadores bioquímicos:** como creatina quinasa (CK), cortisol o lactato, que reflejan daño muscular, estrés o carga metabólica acumulada.
- **Calidad del sueño:** monitorizada por wearables o autoinformes, es un predictor clave del estado regenerativo.
- **Tiempos de reacción o tests neuromusculares:** útiles para detectar fatiga del sistema nervioso central.

El análisis conjunto de estas variables permite estimar con alta precisión si un atleta ha recuperado adecuadamente tras una sesión exigente o un bloque de entrenamiento intenso. Una vez detectados déficits en la recuperación, es posible intervenir con medidas específicas:

- Modulación del volumen e intensidad del entrenamiento.
- Introducción de días de descanso activo.
- Técnicas de recuperación como crioterapia, masajes, baños contrastados o terapia de compresión.
- Intervenciones nutricionales (suplementación, hidratación, estrategias antiinflamatorias).



- Control del estrés y calidad del sueño mediante técnicas de relajación o *biofeedback*.
- Ajustes en la agenda competitiva o en los microciclos de entrenamiento.

El objetivo final es lograr una recuperación funcional, que no solo restaure el estado inicial, sino que además potencie la adaptación al estímulo aplicado. Aquí es donde el dato fisiológico cobra valor, al permitir medir no solo lo que ocurre durante el esfuerzo, sino también lo que sucede después.

En deportes de conjunto, el análisis fisiológico también permite gestionar la carga y recuperación de manera colectiva. A través de plataformas compartidas, es posible:

- visualizar el estado de todos los jugadores en un *dashboard* común,
- identificar a aquellos con mayor riesgo de sobreentrenamiento,
- asignar cargas diferenciadas en función del estado fisiológico,
- personalizar las estrategias de recuperación pospartido,
- coordinar el trabajo del cuerpo técnico de manera más eficaz.

Un ejemplo típico se observa en equipos de fútbol profesional, donde se utilizan registros GPS, análisis de carga interna (como pulsómetros y medidores de lactato) y cuestionarios diarios de bienestar. Los datos se combinan para generar perfiles de carga semanal y detectar «alertas rojas» que indiquen la necesidad de reducir la actividad, ajustar las sesiones o implementar pausas activas. Además, estos datos permiten correlacionar variables fisiológicas con métricas de rendimiento técnico-táctico, lo que abre la puerta a una planificación más integrada y precisa del entrenamiento.

Aplicaciones prácticas en distintas disciplinas deportivas

Atletismo: optimización de ciclos de carga y descarga

El atletismo es un deporte de alta especificidad fisiológica. En pruebas de fondo, como el maratón o los 10 000 metros, la eficiencia aeróbica, el umbral de lactato y la capacidad de recuperación son determinantes del rendimiento. Mediante el análisis de datos fisiológicos, es posible:

- controlar el estado del VO_2 máx. a través de pruebas submáximas realizadas con frecuencia;



- monitorizar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) diariamente para adaptar los microciclos de entrenamiento;
- estimar la fatiga central mediante pruebas neuromusculares simples, como el salto vertical o el *handgrip test*;
- correlacionar el rendimiento en entrenamientos específicos, como los intervalos o *tempo runs*, con los estados fisiológicos para anticipar picos de forma.

Un caso frecuente es el ajuste de la carga semanal ante una respuesta inadecuada al entrenamiento: si el deportista muestra niveles elevados de lactato a intensidades relativamente bajas o una frecuencia cardíaca desproporcionada ante cargas habituales, se introduce un bloque de descarga. Esta estrategia basada en datos reduce el riesgo de sobreentrenamiento y mejora el rendimiento en competencia.

Fútbol: gestión de cargas individuales en un contexto colectivo

El fútbol es una disciplina compleja desde el punto de vista fisiológico, ya que combina esfuerzos intermitentes de alta intensidad con fases de recuperación activa, decisiones tácticas y exposición al contacto físico.

Los equipos de élite han adoptado plataformas integradas que recopilan:

- datos GPS (distancias, aceleraciones, cambios de dirección);
- frecuencia cardíaca y carga cardíaca acumulada.
- escalas subjetivas de fatiga, dolor muscular y calidad del sueño;
- datos hormonales y bioquímicos en ciertos casos (*test* de cortisol, CK).

Gracias a este enfoque, es posible definir perfiles fisiológicos individuales que guían la rotación de jugadores, la selección del once inicial en partidos clave, y la programación de sesiones regenerativas o preventivas.

Por ejemplo, si un centrocampista ha acumulado una carga externa (distancia total y sprints) y una carga interna (frecuencia cardíaca y RPE) excesivas en los últimos tres partidos, puede programarse un entrenamiento individualizado de baja intensidad, acompañado por fisioterapia y recuperación activa, para evitar lesiones musculares o caídas de rendimiento.

Ciclismo: control milimétrico de la carga y la recuperación

El ciclismo es una disciplina privilegiada en cuanto a la disponibilidad de datos. Los medidores de potencia, pulsómetros, sensores de cadencia y plataformas como TrainingPeaks o Strava permiten cuantificar con gran precisión la carga de entrenamiento. Métricas como la *potencia normalizada (normalized power)*, el *training*



stress score (TSS), el *intensity factor* (IF), las curvas de *potencia crítica*, el *W' balance* (reserva de energía anaeróbica) y el *fatigue resistance index* permiten anticipar caídas de rendimiento, ajustar el volumen semanal y definir puntos óptimos de forma competitiva.

A modo de ejemplo, podemos pensar en la preparación de un ciclista para una gran vuelta (tour, giro, vuelta): a partir de los datos fisiológicos y de potencia acumulados en la fase previa, se modela la forma física esperada en la tercera semana de competencia y se ajusta el *tapering* en consecuencia.

Así pues, el análisis de datos fisiológicos se ha consolidado como uno de los pilares de la preparación deportiva contemporánea. Su aplicación permite conocer con mayor profundidad al deportista, no solo en relación con sus capacidades físicas, sino también respecto de su respuesta individual a las cargas de entrenamiento, su tolerancia a la fatiga, su capacidad de recuperación y su evolución a lo largo de los ciclos de preparación. Este conocimiento detallado facilita la detección temprana de signos de fatiga, riesgo de lesión o alteraciones en los patrones habituales de respuesta fisiológica. A partir de esta información, es posible personalizar la carga de trabajo con mayor precisión, ajustándola al momento biológico real del atleta y no únicamente al plan general previsto. Asimismo, permite optimizar los procesos de recuperación mediante estrategias individualizadas, basadas en datos objetivos que refuercen la regeneración y prevengan el sobreentrenamiento. Todo ello desemboca en un modelo de toma de decisiones que ya no se apoya exclusivamente en la percepción o la intuición, sino que incorpora, de forma sistemática, la evidencia cuantificable como soporte.

Sin embargo, el verdadero valor del dato no reside únicamente en su capacidad para ser medido, sino en su utilidad práctica. Medir por medir no conduce al progreso: es indispensable interpretar correctamente lo que se observa, comprender el contexto y extraer conclusiones relevantes. Pero incluso la interpretación más precisa resulta estéril si no se traduce en acciones concretas. Del mismo modo, actuar sin evaluar los efectos de esas decisiones interrumpe el ciclo de mejora continua. Por tanto, medir, interpretar, actuar y evaluar deben concebirse como partes integradas de un proceso dinámico, cuya retroalimentación constante es clave para la evolución sostenida del rendimiento deportivo.

Para que este enfoque basado en datos sea realmente eficaz, debe estar sostenido por una serie de condiciones estructurales y culturales. En primer lugar, es necesaria una cultura de equipo centrada en el bienestar y la mejora del atleta, en la que el dato no sea una herramienta de control autoritario, sino una fuente de entendimiento compartido. En segundo lugar, el cuerpo técnico debe recibir formación continua en el manejo, lectura y aplicación de la información fisiológica, de modo que no se generen brechas entre la obtención del dato y su uso estratégico. Del mismo modo, deben emplearse herramientas tecnológicas que no solo sean precisas y avanzadas, sino también accesibles, comprensibles y funcionales en el día a día del entrenamiento. Junto con ello, es



indispensable establecer protocolos éticos sólidos para la gestión y el uso de los datos, respetando la privacidad del deportista y su derecho a decidir sobre la información que le pertenece. Finalmente, todo el sistema debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a las particularidades individuales y a las circunstancias cambiantes que definen el entorno competitivo.

En definitiva, el dato fisiológico en el deporte de alto rendimiento no debe entenderse como un mapa detallado que indique cada paso, sino más bien como una brújula que orienta, sugiere y guía, pero que deja siempre en manos del equipo humano la responsabilidad de elegir el mejor camino. Es ese equilibrio entre tecnología y criterio, entre objetividad y sensibilidad, entre ciencia y experiencia, lo que define la verdadera calidad de una preparación deportiva adaptada al siglo XXI.

Prevención de lesiones mediante el control de la carga interna

La prevención de lesiones se ha convertido en uno de los pilares más relevantes dentro del entrenamiento deportivo moderno. A medida que las exigencias físicas, psicológicas y competitivas han crecido en prácticamente todas las disciplinas, el número y la gravedad de las lesiones también se ha incrementado. Esto no solo supone un problema de salud para el atleta, sino también una amenaza directa al rendimiento y a la sostenibilidad de las trayectorias deportivas, especialmente en niveles de alto rendimiento.

Durante décadas, la prevención de lesiones se enfocó principalmente en aspectos estructurales: el fortalecimiento muscular, la corrección de desequilibrios biomecánicos, la calidad del gesto técnico, la recuperación post-esfuerzo o incluso el entorno y el equipamiento. Si bien todos estos factores siguen siendo relevantes, la incorporación del **control fisiológico de la carga interna** ha revolucionado nuestra capacidad de anticipar, modular y mitigar los factores de riesgo más silenciosos y difíciles de detectar: aquellos que tienen que ver con la **fatiga sistémica**, el **estrés metabólico**, el **desequilibrio autonómico**, y la **acumulación crónica de cargas no toleradas**.

A continuación, explicaremos cómo el análisis de la carga interna —es decir, la respuesta fisiológica individual ante una carga de entrenamiento o competencia— puede convertirse en la herramienta más poderosa y eficiente para reducir la incidencia de lesiones, tanto agudas como por sobreuso. A través del monitoreo constante, la interpretación inteligente de patrones y la toma de decisiones basada en evidencia, es posible construir un entorno de entrenamiento más seguro, eficaz y adaptado a las particularidades de cada deportista.

Para abordar correctamente la prevención de lesiones desde el punto de vista fisiológico, es fundamental comprender qué es y qué no es la carga interna. Este tema ya ha sido tratado en cursos anteriores, pero hagamos un pequeño recordatorio. A diferencia de la carga externa —que se refiere a las demandas objetivas impuestas al organismo, como



los kilómetros recorridos, la velocidad alcanzada, la potencia generada o el número de repeticiones realizadas—, la carga interna refleja **cómo reacciona el cuerpo ante esas demandas**. Es, por tanto, una medición del **estrés fisiológico y psicológico generado por el entrenamiento**.

La carga interna puede medirse a través de múltiples variables, por ejemplo, los siguientes:

- La frecuencia cardíaca (FC) y su comportamiento durante y después del esfuerzo.
- La **variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV)**, que indica el estado del sistema nervioso autónomo.
- Las concentraciones de lactato, cortisol u otros marcadores bioquímicos.
- La percepción subjetiva del esfuerzo (escala RPE).
- Indicadores de fatiga neuromuscular (por ejemplo, pérdida de altura en el salto vertical).
- Calidad del sueño, niveles de estrés, estado emocional, entre otros.

Lo esencial es que, ante una misma carga externa, distintos atletas pueden presentar respuestas fisiológicas completamente distintas. Lo que para un deportista representa una carga óptima, para otro puede ser insuficiente o, en el peor de los casos, una agresión que supere sus capacidades de recuperación. Es aquí donde el control personalizado de la carga interna permite anticipar problemas que de otro modo pasarían desapercibidos.

La prevención comienza con la **detección temprana**. Numerosos estudios han demostrado que los periodos en los que se acumulan niveles elevados de carga interna sin una recuperación proporcional incrementan significativamente el riesgo de lesiones musculares, articulares e incluso psicológicas. Por ello, el objetivo no es evitar la carga— porque el entrenamiento necesita cierto grado de estrés para generar adaptación—, sino **detectar los signos de fatiga no funcional antes de que evolucionen hacia una lesión**.

Entre los principales signos de alerta, pueden mencionarse los siguientes:

- Disminución progresiva del rendimiento a pesar de mantener o incluso reducir la carga externa.
- Descenso persistente en la HRV, especialmente cuando se acompaña de alteraciones del sueño o el estado de ánimo.
- Aumento en el número de errores técnicos o en la calidad del movimiento.
- Presencia de rigidez muscular, dolor sin causa aparente o mayor sensibilidad en evaluaciones de impacto.



- Cambios en biomarcadores inflamatorios o niveles de cortisol elevados.
- Aumento en la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) para cargas habituales.
- Alteraciones en los patrones de descanso o conducta (irritabilidad, insomnio, apatía).

Los sistemas de monitoreo actuales permiten **cruzar estas señales**, detectando combinaciones de variables que indican riesgo inminente. Por ejemplo, un futbolista que presenta baja HRV, aumento del RPE y una disminución de rendimiento neuromuscular, tiene una probabilidad significativamente mayor de sufrir una lesión en los próximos días si no se ajusta la carga.

Una vez detectado el riesgo, la intervención debe ser inmediata, específica y basada en datos. Las medidas preventivas no son «descanso universal» ni eliminación arbitraria de carga, sino una reprogramación inteligente del estímulo. Algunas estrategias frecuentes incluyen:

- reducción o modificación del volumen y la intensidad de la carga, sin suspender por completo el entrenamiento;
- incorporación de sesiones de recuperación activa, fisioterapia o técnicas regenerativas (baños de contraste, crioterapia, masaje profundo);
- ajuste de la nutrición y la hidratación, fundamentales para sostener procesos anabólicos y evitar el catabolismo muscular;
- introducción de sesiones de entrenamiento cruzado con bajo impacto fisiológico (natación, ciclismo, movilidad);
- optimización del descanso nocturno mediante estrategias cognitivas, ambientales o farmacológicas;
- intervención psicológica breve en caso de estrés o ansiedad crónica.

Estas medidas deben aplicarse de forma personalizada, y evaluarse su efecto mediante un nuevo monitoreo de los indicadores fisiológicos. La prevención se transforma así en un proceso dinámico de ajuste, más que en una acción puntual.

Ejemplo práctico: microgestión de cargas en baloncesto profesional

Contexto: equipo de baloncesto de primera división, calendario exigente con 2 partidos por semana.



Problema detectado: durante un periodo de 3 semanas, se observó un aumento significativo de lesiones musculares de isquiotibiales en jugadores exteriores (bases y escoltas).

Análisis fisiológico:

- Jugadores con mayor distancia recorrida y más sprints por partido.
- Descenso en HRV y aumento en RPE durante sesiones regenerativas.
- Pérdida de potencia en *test* de salto (CMJ) tras los partidos.
- Calidad de sueño deficiente por viajes constantes.

Intervención:

- Reducción de volumen de entrenamiento en las 48 h posteriores al partido.
- Entrenamiento individualizado con foco en movilidad y técnica sin impacto.
- Evaluación diaria de carga subjetiva y sueño.
- Introducción de suplementación adaptógena (ashwagandha, magnesio) para reducir el estrés.

Resultados:

- Reducción del 70 % en lesiones musculares en el siguiente mes.
- Mejora del rendimiento en *test* de recuperación.
- Mejor tolerancia subjetiva al calendario competitivo.

El futuro de la prevención pasa por la **automatización inteligente del monitoreo**. Herramientas que integren datos fisiológicos en tiempo real, con sistemas de alertas personalizadas, pueden anticipar problemas incluso antes de que el cuerpo dé señales evidentes.

Entre las tecnologías más utilizadas actualmente, podemos mencionar las siguientes:

- Plataformas de registro como Oura, Whoop, Firstbeat o Garmin Connect.
- Sistemas de análisis de HRV combinados con machine learning.
- Aplicaciones móviles de registro diario (*wellness logs*, RPE, sueño, carga).
- Sistemas integrados en clubes (Catapult, Kitman Labs, AthleteMonitoring).

En combinación con criterios clínicos y experiencia del cuerpo técnico, estas herramientas no reemplazan al profesional, sino que lo potencian, permitiéndole **ver antes, decidir mejor y actuar a tiempo**.



Futuro de los modelos predictivos para detectar lesiones

En la investigación aplicada en ciencia del deporte y medicina deportiva existen múltiples desafíos que dificultan la comprensión profunda de la causalidad en las lesiones atléticas y la implementación de estrategias preventivas eficaces. La imposibilidad de controlar todas las variables, junto con limitaciones éticas o prácticas, impide el uso generalizado de ensayos controlados aleatorizados (RCT), lo que ha conducido a una dependencia importante de estudios observacionales.

Si bien estos estudios son valiosos para identificar asociaciones, a menudo carecen de herramientas estructuradas que permitan establecer inferencias causales sólidas. Esto limita la capacidad de desarrollar estrategias preventivas basadas en evidencia robusta. En este sentido, se propone el uso de diagramas causales —como modelos conceptuales y grafos dirigidos acíclicos (DAG)— para orientar el proceso investigativo y fortalecer las inferencias causales en este ámbito. Esta metodología no solo facilitaría la identificación de mecanismos específicos de lesión, sino también contribuiría al diseño de intervenciones preventivas más efectivas y fundamentadas teóricamente, reduciendo riesgos metodológicos como el «data fishing» o el HARKing.

Además, este enfoque se alinea con marcos conceptuales consolidados, como la «secuencia de prevención» y el modelo TRIPP, que destacan la importancia de comprender la etiología y los mecanismos de lesión antes de diseñar intervenciones preventivas (Kalkhoven et al., 2024).

Recientemente, también se están incorporando datos ómicos para medir la carga interna (metaboloma), en conjunto con la carga externa registrada mediante GPS y la predisposición genética a sufrir lesiones. En este sentido, el estudio realizado por González et al. (2024) representa un avance significativo, al desarrollar un modelo predictivo de lesiones que integra múltiples fuentes de datos: clínicos, de carga externa obtenidos mediante sistemas de posicionamiento global y datos multiómicos, que incluyen análisis genómicos y metabolómicos. El objetivo fue profundizar en la comprensión de los factores que contribuyen a la ocurrencia de lesiones no traumáticas en jugadoras de élite, con la intención de diseñar intervenciones personalizadas y más eficaces.

El diseño del estudio fue prospectivo, abarcó dos temporadas completas (2019-2020 y 2021-2022) e incluyó a 24 jugadoras de la liga femenina española, analizando específicamente lesiones sin contacto, como las musculares y ligamentarias. Para evaluar la carga externa se utilizaron datos de GPS, con los que se cuantificaron variables como la distancia recorrida y la velocidad. Para estudiar la predisposición genética se analizaron polimorfismos en genes vinculados con la integridad muscular y de los tejidos conectivos. Además, mediante análisis metabolómicos se evaluó la carga interna, reflejando el estado fisiológico y metabólico de las deportistas.



Durante el periodo de estudio se registraron 40 lesiones sin contacto, siendo predominantes las musculares (63 %) y ligamentarias (20 %). El modelo predictivo inicial incluyó variables clásicas como la masa grasa y consideró el efecto aleatorio individual de cada jugadora. En el análisis genético, seis polimorfismos ubicados en los genes DCN, ADAMTS5, ESRRB, VEGFA y MMP1 demostraron estar significativamente asociados con la ocurrencia de lesiones, incluso después de ajustar por la carga de trabajo. A partir de estos polimorfismos se construyó un *score* genético que permitió clasificar a las jugadoras en diferentes perfiles de riesgo, con un nivel de significancia estadística alto ($p = 3.1 \times 10^{-4}$).

Asimismo, se identificaron tres metabolitos —alanina, serotonina y 5-hidroxitriptófano— que mostraron correlaciones significativas con la incidencia de lesiones, reflejando la importancia del estado metabólico y neuromodulador en la vulnerabilidad a la lesión. La combinación de variables basales, el «score» genético y la carga externa derivada del GPS conformaron el modelo con mayor capacidad predictiva, alcanzando un índice C de 0,74, lo que indica una precisión moderadamente alta para predecir lesiones.

Este estudio subraya la posibilidad de diseñar estrategias de prevención de lesiones personalizadas, basadas en la vulnerabilidad específica de cada atleta, mediante la integración de información genética, metabólica y de carga física. No obstante, los autores enfatizan la necesidad de realizar investigaciones adicionales, especialmente en población femenina, con estudios de validación en diferentes equipos e individuos. Ampliar la diversidad de la muestra y replicar los resultados contribuirá a fortalecer la robustez y la aplicabilidad general del modelo, acercando cada vez más la ciencia deportiva a la medicina personalizada en el deporte de élite femenino.

Optimización de la periodización del entrenamiento

La periodización del entrenamiento es un concepto fundamental en la planificación deportiva que busca organizar y distribuir las cargas de trabajo a lo largo del tiempo para maximizar el rendimiento y minimizar el riesgo de fatiga o lesión. Tradicionalmente, la periodización se basaba en modelos teóricos y experiencia del entrenador, pero la incorporación de datos fisiológicos ha revolucionado esta práctica, permitiendo una planificación dinámica, personalizada y adaptativa. Optimizar la periodización mediante el uso de información fisiológica precisa no solo mejora el rendimiento, sino que también contribuye a una recuperación más eficiente y reduce la probabilidad de sobrecarga.

La respuesta fisiológica individual a diferentes tipos de entrenamiento es variable y está influenciada por factores como la genética, el estado de forma, la nutrición y el estrés externo. Por ello, la monitorización constante de parámetros fisiológicos —como la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), el lactato sanguíneo, la carga de entrenamiento interno y externo, el nivel de hormonas como el cortisol o la



testosterona, y variables de sueño y recuperación— permite evaluar cómo responde el organismo ante las cargas de trabajo.

Esta información posibilita ajustar la intensidad, volumen y tipo de entrenamiento en tiempo real, creando un ciclo de retroalimentación que permite al entrenador modificar el programa para evitar el sobreentrenamiento o la fatiga crónica. Por ejemplo, una caída sostenida en la VFC puede indicar estrés acumulado, por lo que un ajuste en la intensidad o la introducción de días de recuperación activa podría ser recomendado. De esta forma, la planificación ya no es un proceso rígido, sino fluido y adaptado a las necesidades del deportista.

La periodización debe tener en cuenta las fechas de competencias principales y eventos clave, donde el objetivo es alcanzar el pico máximo de rendimiento. A partir del análisis de datos fisiológicos, se puede identificar el momento óptimo para incrementar la carga o realizar un tapering (reducción progresiva de la carga) antes de la competencia. La personalización del tapering es crucial, ya que cada deportista responde de manera diferente al período de reducción, y un manejo inadecuado puede conducir a un descenso en la forma física o una recuperación incompleta.

Además, en deportes con múltiples eventos a lo largo de la temporada, la periodización debe considerar ciclos cortos y largos de entrenamiento y recuperación, evitando la acumulación de fatiga y manteniendo la frescura física y mental. Los datos fisiológicos permiten planificar estas fases con mayor precisión, anticipando los momentos en que el deportista puede estar en mayor riesgo de fatiga o lesión y ajustando las cargas en consecuencia.

Como hemos comentado anteriormente, el avance en tecnologías de monitoreo —como dispositivos portátiles (*wearables*), sistemas GPS, análisis de sangre y saliva en tiempo real, y plataformas digitales de gestión de datos— ha permitido la recopilación continua y exhaustiva de datos fisiológicos. Estos datos, combinados con técnicas de análisis predictivo y algoritmos de inteligencia artificial, permiten no solo evaluar el estado actual del deportista, sino también anticipar su respuesta a futuras cargas.

Los modelos predictivos pueden estimar la probabilidad de fatiga, recuperación o lesión con base en patrones históricos y variables fisiológicas actuales, facilitando la toma de decisiones informadas en la programación del entrenamiento. Este enfoque proactivo mejora la eficiencia del entrenamiento y contribuye a la sostenibilidad del rendimiento a largo plazo.

El principal beneficio de la optimización de la periodización a partir de datos fisiológicos es la individualización del entrenamiento, que respeta las particularidades de cada deportista y promueve un desarrollo progresivo y seguro. Además, mejora la comunicación entre el cuerpo técnico y el atleta, basando las decisiones en evidencias objetivas y cuantificables.



Sin embargo, también existen retos significativos. La interpretación de los datos fisiológicos requiere formación especializada, y la gran cantidad de información puede generar «ruido» que dificulte la toma de decisiones si no se gestiona adecuadamente. Además, la dependencia excesiva de la tecnología puede disminuir la capacidad del entrenador para utilizar la experiencia y la observación directa, elementos que siguen siendo indispensables. Por último, se debe garantizar la ética y la privacidad en la gestión de los datos personales de los deportistas.

Ejemplos prácticos y casos de estudio

1. Monitorización continua del lactato y caso de éxito: Jakob Ingebrigsten

La monitorización continua del lactato sanguíneo ha revolucionado la manera en que se gestiona el entrenamiento en atletas de élite, especialmente en disciplinas de resistencia y velocidad media, como el atletismo. Tradicionalmente, la medición del lactato se realizaba en pruebas puntuales, pero hoy en día, la tendencia es hacia una recopilación longitudinal y casi en tiempo real, permitiendo un control más fino y personalizado de las adaptaciones metabólicas y la carga de trabajo.

Uno de los ejemplos más emblemáticos del uso avanzado de esta tecnología y enfoque es el del corredor noruego **Jakob Ingebrigsten**, campeón olímpico y récord mundial en mediofondo. El equipo de Ingebrigsten ha implementado un sistema de monitorización continua del lactato para ajustar la intensidad y volumen de su entrenamiento día a día, basado en datos metabólicos precisos.

¿Cómo funciona esta monitorización en la práctica?

El lactato refleja el balance entre su producción y eliminación durante el ejercicio, y su concentración en sangre es un marcador directo de la intensidad metabólica. Con dispositivos portátiles y tecnologías innovadoras, el equipo de Ingebrigsten ha podido recoger datos de lactato en múltiples sesiones a lo largo de semanas y meses, generando un perfil metabólico longitudinal. Esto les ha permitido identificar con precisión los umbrales aeróbico y anaeróbico del atleta, que no son estáticos y varían con su estado físico y fatiga acumulada.

Esta información longitudinal facilita detectar signos tempranos de fatiga o sobrecarga —por ejemplo, si Jakob comienza a mostrar un aumento en los niveles basales de lactato o produce más lactato a intensidades que antes toleraba bien, el equipo puede modificar la carga para evitar el sobreentrenamiento y optimizar la recuperación.

Además, la monitorización continua permite una individualización extrema de la periodización, ajustando las zonas de entrenamiento para maximizar la eficiencia



metabólica y estimular adaptaciones sin riesgos. Por ejemplo, en semanas previas a competencias clave, el entrenamiento se adapta para reducir la acumulación de lactato, mejorando la capacidad de resistencia y velocidad sostenida.

Resultados y repercusiones

El éxito competitivo de Jakob Ingebrigsten no solo responde a su talento natural y disciplina, sino también al uso de tecnologías avanzadas que optimizan su rendimiento mediante datos objetivos y en tiempo real. Su capacidad para mantener un control metabólico detallado ha permitido realizar ajustes finos en el entrenamiento, potenciar su rendimiento y reducir el riesgo de fatiga excesiva o lesión.

Este enfoque representa un modelo de referencia para atletas y equipos que buscan maximizar resultados mediante la ciencia aplicada. La integración de datos longitudinales de lactato con otros parámetros fisiológicos, como la frecuencia cardíaca y potencia, ofrece una visión holística que mejora significativamente la toma de decisiones y la personalización del entrenamiento.

Perspectivas futuras

Aunque la monitorización continua del lactato es una tecnología avanzada y aún en desarrollo, casos como el de Jakob Ingebrigsten demuestran su enorme potencial para la optimización del rendimiento deportivo. A medida que estos sistemas se vuelvan más accesibles y se integren con otras tecnologías, se espera que cada vez más deportistas puedan beneficiarse de esta aproximación personalizada, basada en datos objetivos y dinámicos. En este sentido, actualmente varias empresas están desarrollando tecnologías que permiten monitorizar el lactato de forma continua y no invasiva a través del sudor. Un ejemplo destacado es **Onalabs**, que está trabajando en sensores portátiles capaces de medir metabolitos como el lactato directamente desde el sudor en tiempo real.

Esta innovación tiene un enorme potencial, ya que facilita un monitoreo mucho más cómodo, sin necesidad de extracciones sanguíneas frecuentes, lo que podría hacer posible el uso de estas tecnologías en entrenamientos diarios y competiciones con un impacto mínimo en el atleta. Los beneficios incluyen una mayor frecuencia y precisión en la obtención de datos metabólicos, lo que a su vez permitirá una respuesta aún más rápida y personalizada a las necesidades fisiológicas del deportista.

Con la adopción masiva de estas tecnologías, la periodización del entrenamiento y la gestión de la fatiga podrían alcanzar niveles de precisión y eficiencia sin precedentes, consolidando un nuevo estándar en la optimización del rendimiento deportivo de élite.

INEOS Grenadiers y la optimización del rendimiento a través de la agregación de «*marginal gains*» y biomarcadores



El éxito revolucionario del equipo ciclista INEOS Grenadiers no se debe a un solo factor, sino a la suma de pequeños avances continuos en múltiples aspectos del entrenamiento, la recuperación y la preparación física. Esta estrategia, conocida como la agregación de «*marginal gains*» (ganancias marginales), fue popularizada inicialmente por Dave Brailsford, quien transformó al ciclismo británico a partir de 2003, logrando resultados históricos como la victoria en el Tour de Francia de Bradley Wiggins en 2012 y el dominio sostenido del equipo en las siguientes temporadas.

El principio fundamental detrás de esta filosofía es que mejorar un 1 % en cada área relacionada con el rendimiento, aunque parezca insignificante, se traduce en una mejora global sustancial cuando todas estas pequeñas ganancias se combinan. En el caso de INEOS, la estrategia se ha aplicado mediante los siguientes elementos:

- **Monitorización avanzada con biomarcadores.** El equipo utiliza una amplia gama de datos fisiológicos y bioquímicos para evaluar la carga interna, la fatiga y la respuesta individual a los entrenamientos. Entre ellos, destacan los biomarcadores sanguíneos y metabólicos, que proporcionan información objetiva sobre el estado inflamatorio, la recuperación muscular y el equilibrio energético del ciclista.
- **Tecnología de precisión para el control del entrenamiento.** Se emplean sensores de potencia, frecuencia cardíaca y análisis biomecánicos que permiten personalizar las sesiones, optimizar la cadencia y la técnica, y minimizar el riesgo de lesiones.
- **Datos longitudinales y análisis de *big data*.** La recopilación constante y el análisis longitudinal de los datos permiten detectar patrones individuales y anticipar riesgos o necesidades de ajuste en tiempo real. Esta estrategia también facilita la identificación de las mejores prácticas para cada atleta, adaptando la preparación a sus características específicas.
- **Optimización del entorno y la recuperación.** El equipo presta atención a detalles aparentemente menores, como la calidad del sueño monitorizada mediante variabilidad de frecuencia cardíaca (HRV), el control de la nutrición y la hidratación, y la mejora de la aerodinámica mediante estudios en túneles de viento.

Este enfoque holístico y minucioso ha permitido al equipo INEOS alcanzar niveles excepcionales de rendimiento, manteniendo a sus ciclistas en condiciones óptimas para afrontar las exigencias de las grandes vueltas y competiciones internacionales.

Unidad 2. Innovación y desarrollo futuro



Integración de inteligencia artificial en el análisis de datos

Esta tecnología no solo permite recopilar información fisiológica en tiempo real — frecuencia cardíaca, variabilidad de la frecuencia cardíaca, lactato, glucemia, saturación de oxígeno, temperatura corporal, entre otras—, sino que también puede analizarla con una capacidad y velocidad imposibles para el ser humano. La inteligencia artificial identifica patrones complejos, correlaciones no evidentes y relaciones causales que pueden tener implicancias directas en la planificación del entrenamiento y la prevención de lesiones.

Entre las aplicaciones más potentes se encuentra la generación de predicciones automatizadas. Por ejemplo, algoritmos de *machine learning* pueden anticipar situaciones de sobreentrenamiento, fatiga acumulada o riesgo de lesión a partir de la combinación de diversas variables fisiológicas y contextuales. Esto representa un salto cualitativo respecto de los métodos tradicionales, que dependían en gran medida del juicio subjetivo. Con estos sistemas, se pueden tomar decisiones basadas en evidencia objetiva, personalizada y continuamente actualizada.

Otra de las grandes ventajas es la posibilidad de ofrecer recomendaciones automatizadas en tiempo real. Algunos sistemas ya disponibles en el mercado ajustan la carga de entrenamiento en función de la respuesta del organismo, modifican la intensidad de una sesión o incluso sugieren estrategias de recuperación, hidratación o alimentación. Estas herramientas convierten el entrenamiento en una experiencia adaptativa y dinámica, centrada en el deportista, y no en una programación genérica e inflexible.

La personalización avanzada que ofrece la IA transforma el enfoque tradicional de la preparación física. Cada deportista presenta una biología y una historia de entrenamiento diferente, y la IA permite atender esta individualidad con un nivel de detalle inédito. Al analizar datos longitudinales, se pueden identificar tendencias específicas en cada sujeto, ajustar progresiones, detectar puntos de estancamiento y optimizar fases de carga y descarga.

Más allá de la preparación física, la IA también está incursionando en el análisis del bienestar general, el sueño, el estado emocional y el nivel de recuperación. En conjunto, estos datos construyen una imagen integral del estado del deportista y permiten tomar decisiones más acertadas. A medida que la tecnología avanza, también se están desarrollando modelos que integran datos fisiológicos, biomecánicos, psicológicos y contextuales en sistemas de análisis holísticos y predictivos.

El futuro apunta hacia ecosistemas inteligentes donde el entrenamiento, la nutrición, el sueño, la salud mental y el rendimiento se integran en un único entorno de gestión digital. La IA actuará como un asistente permanente que aprenderá de cada sesión y de cada respuesta fisiológica para mejorar continuamente las decisiones de entrenamiento.



Modelos de predicción y su aplicación en el deporte

Uno de los usos más revolucionarios de la inteligencia artificial en el ámbito deportivo es el desarrollo y la aplicación de modelos de predicción. Estos modelos, entrenados mediante *machine learning*, tienen la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos históricos y actuales para anticipar eventos futuros con un alto grado de precisión. En el contexto de la fisiología del ejercicio, esto se traduce en una herramienta poderosa para optimizar el rendimiento, prevenir lesiones y personalizar el entrenamiento.

De Moneyball al aprendizaje automático: el camino hacia el deporte predictivo

El concepto de predicción basada en datos no es nuevo en el deporte. La historia que inspiró la película *Moneyball* marcó un hito al demostrar cómo el análisis estadístico podía superar el conocimiento tradicional en la toma de decisiones. El equipo de béisbol de los Oakland Athletics, liderado por Billy Beane, empleó estadísticas avanzadas —sabermetría— para identificar jugadores subvalorados que, colectivamente, ofrecían un rendimiento equivalente al de los grandes fichajes. Este modelo fue el precursor del enfoque basado en datos que hoy permite el desarrollo de modelos predictivos mucho más sofisticados gracias a la inteligencia artificial.

Aplicaciones actuales de modelos de predicción en el rendimiento deportivo

- **Análisis de rendimiento y optimización de cargas**

Los modelos predictivos permiten anticipar cómo responderá un atleta ante determinadas cargas de entrenamiento. Utilizando variables como la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), los niveles de lactato, la calidad del sueño y distintos marcadores de recuperación, los algoritmos son capaces de estimar con qué intensidad, duración y tipo de estímulo se alcanzarán mejores resultados. Esto no solo contribuye a evitar el sobreentrenamiento, sino que también permite optimizar el rendimiento mediante una planificación más precisa y adaptada a la fisiología individual.

A modo de ejemplo, plataformas como Whoop y TrainAsONE aplican inteligencia artificial para ajustar en tiempo real los planes de entrenamiento según la respuesta fisiológica y el contexto del deportista. Estos sistemas aprenden de cada sesión para ofrecer una combinación óptima de carga y recuperación, favoreciendo así una evolución sostenida del rendimiento.

Prevenición de lesiones

Uno de los usos más extendidos y valiosos de la inteligencia artificial en el deporte es la predicción del riesgo de lesiones. A través del análisis de grandes volúmenes de datos, los modelos de aprendizaje automático pueden identificar patrones relacionados con la



fatiga, desequilibrios biomecánicos, déficits en la recuperación o una carga de entrenamiento excesiva. A partir de estos patrones, se estima la probabilidad de que un deportista sufra una lesión en determinados contextos, lo que permite implementar estrategias preventivas personalizadas y más eficaces.

No obstante, la aplicación práctica de estos modelos todavía presenta importantes limitaciones. Aunque diversos estudios han demostrado un rendimiento predictivo prometedor, la utilidad clínica puede verse comprometida por varios factores: ventanas de predicción demasiado amplias, definiciones poco precisas de lo que se considera una lesión y falta de estandarización en las variables dependientes. Además, muchos se basan en conjuntos de datos pequeños o limitados y presentan una considerable heterogeneidad metodológica —por ejemplo, diferencias en el tamaño de las cohortes o en los criterios de inclusión—, lo que dificulta la generalización de los resultados (Leckey et al., 2024).

A pesar de estos desafíos, la tendencia es clara: el uso de modelos predictivos para reducir el riesgo de lesión representa una de las fronteras más prometedoras en la evolución del entrenamiento deportivo personalizado. Con mejoras en la calidad de los datos y la estandarización de criterios, estas herramientas tendrán un impacto cada vez mayor en la práctica profesional.

Como ejemplo, el FC Barcelona desarrolló un modelo predictivo pionero para prevenir lesiones en futbolistas de élite, específicamente en su equipo femenino. Este modelo combina datos clínicos, carga externa medida con GPS y datos biológicos avanzados, como información genética (genómica) y metabolómica. Durante dos temporadas, se analizaron 24 jugadoras y se registraron 40 lesiones no traumáticas, en su mayoría musculares. El modelo identificó polimorfismos genéticos asociados al riesgo de lesión, así como metabolitos vinculados a estados de mayor vulnerabilidad fisiológica. Al integrar estos datos con la carga de entrenamiento, el sistema clasificó a las deportistas según su perfil de riesgo con un índice predictivo notable (C-index: 0,74). Este enfoque facilita el diseño de intervenciones personalizadas basadas en la susceptibilidad individual, abriendo la puerta a una prevención de lesiones más precisa y eficiente en el deporte profesional (González et al., 2024).

En la NBA, diversos equipos emplean inteligencia artificial para monitorizar en tiempo real el estado de sus jugadores. Si un jugador presenta señales de fatiga acumulada o alteraciones en sus patrones de movimiento, el sistema alerta a los preparadores físicos para reducir su carga o modificar su participación en entrenamientos y partidos.

- **Reclutamiento y scouting de talentos**



La IA también se aplica al scouting mediante el análisis automático del rendimiento de cientos o miles de atletas. Los modelos pueden ponderar variables físicas, técnicas y tácticas, además de indicadores fisiológicos, para calcular un «índice de potencial» o una proyección de desarrollo futuro.

Por ejemplo, el Arkéa Samsic Talent ID Program, apoyado por AWS, utilizó *machine learning* para evaluar más de 650 ciclistas de 38 nacionalidades a partir de datos de rendimiento. El sistema no solo identificó talentos destacados, sino que también predijo qué atletas tenían mayor probabilidad de progresar, incluso cuando aún no sobresalían a simple vista.

- **Análisis táctico y decisiones en tiempo real**

Algunos modelos están diseñados para interpretar situaciones de juego en tiempo real y sugerir acciones tácticas basadas en datos. En deportes como el fútbol o el rugby, la IA analiza continuamente posiciones, trayectorias, interacciones y niveles de esfuerzo, y puede predecir desajustes defensivos o ventanas de oportunidad ofensivas.

Por ejemplo, la tecnología de SkillCorner utiliza visión por computadora y modelos de *machine learning* para extraer datos tácticos a partir de grabaciones de vídeo, proporcionando insights de análisis sin necesidad de sensores en tiempo real. Esto ha transformado tanto el análisis pospartido como la toma de decisiones en fichajes.

A pesar de su enorme potencial, el uso de modelos predictivos en el deporte enfrenta desafíos significativos. El principal es el riesgo de confiar ciegamente en predicciones sin considerar el contexto individual y los factores intangibles del rendimiento humano. La sobredependencia de los algoritmos puede dar lugar a decisiones deshumanizadas si no se interpretan adecuadamente los datos.

Otro aspecto clave es la privacidad y seguridad de la información. El entrenamiento de modelos predictivos exige manejar datos sensibles, lo que requiere establecer normas claras sobre quién accede a esa información y con qué fines.

Finalmente, la correcta interpretación de los resultados exige una combinación de competencias técnicas y deportivas. Los equipos que obtienen mejores resultados con IA no solo cuentan con modelos avanzados, sino también con personal capacitado para traducir esos *outputs* en decisiones contextualizadas y accionables.

Colaboración interdisciplinaria en el deporte

En las últimas décadas, el deporte de alto rendimiento ha incorporado equipos de apoyo con especialistas de diversas áreas (medicina, fisioterapia, preparación física, nutrición, psicología, entre otras) para maximizar el rendimiento de los atletas. Esta proliferación



de voces expertas responde a la creciente complejidad de preparar deportistas de élite y promete ventajas significativas si se logra una integración efectiva del conocimiento disponible. Sin embargo, la mera coexistencia de múltiples especialistas no garantiza el éxito: sin una coordinación adecuada, los mensajes hacia el atleta pueden volverse confusos e incluso contradictorios (Burns y Collins, 2023). Por ello, se investigan estrategias para trabajar colaborativamente en estos equipos y lograr que el apoyo al deportista se brinde de forma coherente y unificada. En años recientes, el aumento de la especialización y la evidencia de los beneficios de la coordinación han dado un impulso definitivo a este enfoque (Rollo et al., 2021).

Un desafío inicial es aclarar la terminología. Términos como multidisciplinar, interdisciplinar y transdisciplinar suelen emplearse de forma ambigua en el ámbito deportivo (Burns y Collins, 2023). No obstante, cada concepto tiene matices propios. A continuación, se describe brevemente cada enfoque y se destaca por qué la verdadera colaboración interdisciplinaria —es decir, la integración real entre áreas— se considera la más propicia para los equipos de rendimiento.

Según Burns y Collins (2023), las diferencias entre los distintos enfoques se pueden resumir del siguiente modo:

- **Multidisciplinar.** Varias disciplinas que trabajan en paralelo con escasa interacción entre sí.
- **Interdisciplinar:** conexión deliberada entre disciplinas que colaboran recíprocamente, compartiendo información y ajustando sus métodos hacia objetivos comunes.
- **Transdisciplinar:** integración que trasciende las disciplinas, creando un marco unificado con un lenguaje común.

En definitiva, mientras lo multidisciplinar supone una suma de contribuciones independientes, lo interdisciplinar implica una integración activa entre expertos, y lo transdisciplinar aspira a una fusión de perspectivas en un nuevo paradigma compartido. Es importante señalar que en el deporte de élite abundan los equipos multidisciplinarios, pero la verdadera colaboración interdisciplinaria no ocurre automáticamente al reunir profesionales diversos. Requiere intencionalidad, estructuras apropiadas y una cultura propicia. Estudios recientes subrayan que los desafíos actuales del rendimiento exceden lo que una sola especialidad puede abordar por sí sola, haciendo imprescindible una colaboración integrada (Rollo et al., 2021).

Burns y Collins (2023) identifican cuatro áreas clave que los equipos deportivos deben atender para lograr una práctica interdisciplinaria exitosa: un marco teórico compartido, el liderazgo facilitador y la cultura de equipo, las estructuras y procesos organizativos, y las cualidades personales e interpersonales del grupo de trabajo.



Un hallazgo central es la importancia de establecer marcos conceptuales comunes que orienten el trabajo del equipo interdisciplinario. Contar con una filosofía de programa o un modelo teórico compartido funciona como una «hoja de ruta» que alinea a todos los especialistas bajo objetivos y valores coherentes (McCalla y Fitzpatrick, 2016). Dado que cada disciplina suele operar bajo supuestos y jerga propios, un marco unificador proporciona un lenguaje común y principios compartidos que facilitan la integración del conocimiento. Adoptar colectivamente un marco de referencia contribuye a evitar choques de visiones entre áreas.

La literatura sugiere que una filosofía de programa clara mejora la coherencia en la toma de decisiones, mientras que su ausencia puede propiciar enfoques discordantes. Para lograrlo, se propone formar profesionales con experiencia más allá de su especialidad —perfiles «en T»—, capaces de dialogar con colegas de otras disciplinas. En síntesis, cimentar al equipo en una visión teórica compartida provee la base conceptual, el lenguaje y las metas alineadas que guían el trabajo conjunto.

El segundo pilar subraya el rol crítico del liderazgo y la cultura organizativa en el funcionamiento de un equipo interdisciplinario. Los equipos más exitosos suelen tener una cultura fuerte que antepone el objetivo colectivo a los intereses individuales. En tal entorno, aunque cada integrante tenga sus propias ambiciones, todos reconocen la primacía del éxito grupal. El líder del equipo —frecuentemente el entrenador en jefe o un director de rendimiento— desempeña aquí un papel fundamental, pues debe coordinar al grupo y gestionar las tensiones internas (como equilibrar el alto rendimiento con el cuidado de la salud del atleta) para mantener la cohesión del conjunto.

Un liderazgo facilitador implica habilitar la colaboración y crear un ambiente de confianza con valores compartidos. Los líderes eficaces tienden puentes entre disciplinas, actuando casi como «traductores» capaces de comunicarse en la jerga científica del equipo de apoyo y, a la vez, en el lenguaje práctico de los entrenadores y atletas. Esta capacidad de liderazgo «multilingüe» ha sido señalada como clave para integrar la ciencia del deporte con la práctica diaria, sin que ninguna se imponga o se diluya. El líder promueve una cultura de colaboración en la que la retroalimentación fluye libremente entre preparadores físicos, médicos, psicólogos y entrenadores técnicos, evitando compartimentos estancos. En suma, la calidad del liderazgo y la cultura fomentada desde la dirigencia son determinantes para que un grupo multidisciplinar funcione realmente como un equipo integrado.

El tercer pilar se refiere a las estructuras organizativas y los procesos de trabajo que pueden facilitar (o entorpecer) la colaboración interdisciplinaria. Una observación consistente es que la claridad en la definición de roles y responsabilidades dentro del equipo es esencial para evitar roces innecesarios. La falta de claridad puede conducir a solapamientos o contradicciones en la atención al deportista, por lo que resulta vital acordar las funciones de cada miembro desde el inicio para evitar conflictos. Por ejemplo,



sin una coordinación adecuada, un fisioterapeuta y un preparador físico podrían prescribir ejercicios de rehabilitación redundantes o con objetivos opuestos tras una lesión (Collins & Collins, 2012). Sin comunicación abierta y entendimiento mutuo de las funciones de cada uno, situaciones así pueden escalar en tensiones interpersonales y terminar brindando al deportista indicaciones confusas. Por el contrario, cuando cada especialista comprende su rol y el de los demás, y existe un proceso claro para la toma de decisiones conjunta, aumenta la eficiencia del equipo y la coherencia del servicio al atleta (Reilly et al., 2000).

Diversos ajustes organizativos pueden mejorar la integración. Es importante establecer jerarquías funcionales claras (por ejemplo, definir quién tiene la última palabra en ciertas decisiones), al mismo tiempo que se mantienen canales horizontales de comunicación que den voz a todos los especialistas. Asimismo, es valioso destinar tiempo específico en la agenda para la interacción interdisciplinaria —reuniones periódicas de todo el staff en las que se discutan conjuntamente los planes de entrenamiento, la prevención de lesiones, etc.— de modo que la colaboración no se vea desplazada por las urgencias del día a día (Sporer y Windt, 2018). En síntesis, estructuras con roles bien definidos, espacios formales de intercambio y apoyo logístico apropiado constituyen la infraestructura necesaria para que la interdisciplinarietà prospere.

El cuarto pilar se enfoca en las cualidades individuales de los profesionales y en las dinámicas interpersonales dentro del equipo. La eficacia de un equipo de soporte no depende solo de la capacidad técnica de cada miembro, sino también de las habilidades sociales para integrarla. Por ello se destaca la importancia de la comunicación abierta y la confianza mutua: contar con canales fluidos y una actitud de diálogo facilita la verdadera integración. Igualmente, una actitud integradora y la capacidad para formar alianzas son cualidades críticas en el personal de apoyo. Incluso un especialista altamente cualificado puede convertirse en un obstáculo si no sabe trabajar en equipo.

La importancia de estas cualidades se refleja en hallazgos concretos: en el fútbol de élite se observó que los equipos con peor comunicación entre el entrenador y el personal médico sufrieron más lesiones, mientras que una comunicación estrecha se asoció con una menor incidencia (Ekstrand et al., 2019). Por otra parte, en entornos muy jerárquicos, algunos profesionales pueden sentirse infravalorados si su contribución no es tan visible o cuantificable como la de otros, lo cual puede llevarlos a competir en lugar de cooperar. Por ello, es crucial cultivar un entorno donde todos los especialistas se sientan igualmente valorados, entendiendo que, aunque su aporte sea menos visible, contribuye al éxito final del deportista. En síntesis, las competencias personales como la comunicación, la apertura mental y la disposición a «cruzar fronteras» disciplinares son cimientos humanos de la colaboración interdisciplinaria. Fomentar estas cualidades en el personal —mediante capacitación en trabajo en equipo o criterios de selección que privilegien la



actitud colaborativa— puede marcar una diferencia sustancial en la eficacia de los equipos de alto rendimiento.

Ejemplo práctico: retorno al deporte tras una lesión

Un escenario que ilustra de forma concreta los beneficios del enfoque interdisciplinario es el proceso de rehabilitación y retorno a la competición tras una lesión grave. La complejidad de atender simultáneamente la recuperación física, la readaptación deportiva y el bienestar mental de un atleta lesionado excede las capacidades de una sola disciplina, por lo que la rehabilitación constituye un ámbito propicio para la colaboración interdisciplinaria (McCalla y Fitzpatrick, 2016). Para guiar a un deportista desde la lesión hasta su vuelta al máximo nivel, se requiere un plan integral coordinado que involucre desde el inicio al médico, fisioterapeuta, preparador físico, psicólogo deportivo y demás especialistas pertinentes, asegurando objetivos comunes y mensajes coherentes hacia el atleta en cada etapa. Esto contrasta con un enfoque tradicional fragmentado, en el cual cada experto actúa de forma aislada y secuencial, lo que puede provocar desconexiones en la transición entre fases.

Los beneficios de un abordaje interdisciplinario en la rehabilitación están documentados. En el fútbol profesional, una comunicación estrecha entre el cuerpo médico y el entrenador se asocia con una menor incidencia de lesiones y recaídas, mientras que una comunicación deficiente conlleva más bajas deportivas. Asimismo, incluir áreas usualmente pasadas por alto —como la psicología y la nutrición— dentro del plan de retorno al juego mejora la preparación integral del atleta. En suma, cuando todos los especialistas trabajan de manera articulada durante la rehabilitación, el deportista recibe un soporte holístico que incrementa sus probabilidades de una recuperación plena y de retomar el rendimiento al máximo nivel.

Implicaciones prácticas para entrenadores y gestores

Los conceptos anteriores conllevan diversas implicaciones prácticas para entrenadores, personal técnico y dirigentes deportivos. En primer lugar, los entrenadores deben adoptar una mentalidad interdisciplinaria, reconociendo que el rendimiento óptimo surge de la suma coordinada de múltiples factores. Para el entrenador principal, esto implica estar dispuesto a integrar las perspectivas del equipo médico y científico en su planificación y toma de decisiones, construyendo relaciones de confianza con dichos especialistas. En lugar de considerar las recomendaciones del nutricionista o del psicólogo como elementos accesorios, debería incorporarlas al plan global del equipo, comprendiendo que todas las áreas contribuyen al objetivo competitivo.

La dirigencia y gestión deportiva deben estructurar los departamentos de rendimiento de manera que faciliten la integración. Esto implica contratar líderes con habilidades colaborativas, establecer protocolos formales de comunicación —como reuniones



interdisciplinarias periódicas e intercambio continuo de información— y definir con claridad las funciones de cada especialista desde el inicio. Asimismo, resulta conveniente asignar a los profesionales una carga de trabajo que les permita colaborar efectivamente, y promover una cultura en la que se valore el aprendizaje mutuo y el trabajo en equipo por encima del lucimiento individual. Es fundamental, además, asegurar que el personal de apoyo disponga del tiempo y los recursos necesarios para una colaboración genuina.

En suma, tanto entrenadores como gestores deben evolucionar desde la mentalidad del «especialista aislado» hacia la del «equipo integrado», implementando las condiciones de liderazgo, estructura y cultura necesarias para que el conocimiento colectivo supere el aporte individual. La colaboración interdisciplinaria se ha vuelto indispensable en el deporte profesional contemporáneo. Integrar de forma eficaz a especialistas de diversos campos ofrece un gran potencial para mejorar el rendimiento de los atletas de manera integral.

Sin embargo, concretar la interdisciplinaria supone un desafío complejo: no basta con reunir a expertos de distintas áreas, sino que es necesario cultivar deliberadamente una filosofía común, un liderazgo facilitador, estructuras organizativas favorables y las habilidades personales adecuadas en el equipo de apoyo. Estos cuatro pilares ofrecen un marco de referencia útil para orientar ese proceso.

En la práctica, los hallazgos sugieren recomendaciones claras: alinear al equipo bajo una visión compartida, promover un liderazgo colaborativo, diseñar estructuras y procesos que fomenten la interacción —como roles bien definidos, canales de comunicación efectivos y tiempos destinados a la coordinación—, y cultivar las competencias interpersonales del personal.

En cuanto a la investigación, persisten numerosas preguntas abiertas. Se requieren estudios longitudinales que sigan el funcionamiento de equipos interdisciplinarios a lo largo del tiempo, así como investigaciones cualitativas que exploren las experiencias de sus integrantes frente a los desafíos cotidianos (Burns y Collins, 2023). Además, es pertinente comparar con otros ámbitos donde el trabajo interdisciplinario está más desarrollado —como la medicina— para identificar estrategias efectivas transferibles al deporte. Avanzar en estas líneas contribuirá a refinar las recomendaciones e impulsar una cultura de colaboración interdisciplinaria, que continuará siendo un factor decisivo en el éxito deportivo.

Desafíos y oportunidades en la gestión de datos.

El crecimiento exponencial en la generación de datos deportivos plantea la necesidad de contar con infraestructuras robustas y eficientes para **almacenar toda esta información**. La naturaleza de los datos —que pueden incluir estadísticas de rendimiento, información



biométrica, datos de salud, localización y comportamiento— requiere sistemas que no solo gestionen grandes volúmenes, sino que también aseguren la integridad y disponibilidad continua de los mismos.

La **seguridad** es una preocupación primordial. Los datos deportivos, especialmente aquellos relacionados con la salud o el rendimiento fisiológico de los atletas, son altamente sensibles y deben estar protegidos contra accesos no autorizados, pérdidas o ataques cibernéticos. El incumplimiento de las normas de seguridad puede llevar a graves consecuencias legales y reputacionales para las organizaciones. Por ello, es imprescindible implementar medidas como el cifrado, sistemas de autenticación robustos y políticas claras de gestión de acceso.

La **privacidad** de los datos personales recogidos en el deporte está regulada por marcos legales estrictos, entre los que destaca el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) de la Unión Europea. Este reglamento establece que los datos personales deben ser tratados con consentimiento explícito, con un propósito legítimo y limitados a lo estrictamente necesario. Los deportistas tienen derechos específicos, como el acceso a sus datos, la rectificación, la limitación del tratamiento y la supresión.

Además del GDPR, existen normativas locales e internacionales que protegen la información personal, y las organizaciones deportivas deben garantizar su cumplimiento para evitar sanciones y proteger la confianza de los atletas y demás partes interesadas. La transparencia en la recopilación y tratamiento de datos, así como la implementación de políticas de privacidad claras y accesibles, son elementos esenciales para cumplir con estos requisitos. La gestión responsable de la privacidad también implica un equilibrio entre la innovación tecnológica y el respeto a la intimidad de los individuos. No basta con proteger los datos; es necesario asegurar que su uso sea adecuado, proporcional y no cause perjuicio a las personas implicadas.

Más allá de las obligaciones legales, el **uso ético** de los datos personales en el deporte es un pilar fundamental para mantener la integridad y equidad en esta área. La ética en la gestión de datos implica adoptar prácticas que respeten la dignidad, autonomía y derechos de los deportistas y otros actores involucrados. El análisis y la aplicación de datos deben orientarse hacia el beneficio del deportista y el equipo, como la mejora del rendimiento, la prevención de lesiones o la optimización de estrategias. Sin embargo, el riesgo de mal uso existe: decisiones basadas únicamente en perfiles estadísticos o biométricos pueden conducir a discriminación, exclusión o presiones indebidas sobre los atletas.

La ética también requiere **transparencia y comunicación clara con los deportistas** y otros titulares de datos sobre qué información se recolecta, con qué fin, cómo se almacena y quién puede acceder a ella. La falta de información o la opacidad pueden generar desconfianza, lo que afecta negativamente a la colaboración y al respeto mutuo. Asimismo, es esencial que las organizaciones deportivas desarrollen políticas internas y



estructuras de gobernanza que promuevan la ética en el manejo de datos. Esto incluye la formación continua de los profesionales en aspectos éticos y legales, así como la creación de comités o figuras responsables que supervisen el uso adecuado de la información. Finalmente, la ética en el uso de datos no solo se limita a los deportistas, sino que también se extiende a los aficionados y otros usuarios. La monetización de datos para fines comerciales debe respetar los límites de la privacidad y evitar prácticas invasivas o manipulativas.

Un ejemplo claro donde se trabaja con especial atención los aspectos éticos es el uso de test genéticos para identificar la predisposición a lesiones en deportistas (Ribans et al., 2022). En la actualidad, muchas compañías de test genéticos directos al consumidor (DTC, por sus siglas en inglés) ofrecen pruebas que prometen evaluar la predisposición a lesiones musculoesqueléticas. Aunque este sector está creciendo y genera gran interés, la evidencia científica que respalde el uso de polimorfismos específicos como marcadores fiables sigue siendo muy limitada y controvertida. Por ejemplo, polimorfismos comúnmente incluidos en estas pruebas comerciales, como COL1A1 rs1800012, COL5A1 rs12722 y GDF5 rs143383, no cuentan con respaldo científico suficiente para ser considerados indicadores válidos de riesgo. Algunos estudios señalan que, aunque ciertas asociaciones pueden existir, muchas variantes relevantes son extremadamente raras o inexistentes en poblaciones africanas, americanas o asiáticas, lo que limita su aplicación global. Asimismo, la sensibilidad y validez de muchos de estos marcadores no se ha confirmado de forma independiente en investigaciones posteriores.

Este contexto científico pone en evidencia que actualmente es prematuro, y en muchos casos inapropiado, comercializar test genéticos para predecir el riesgo de lesiones deportivas. Más allá de la precisión técnica, el uso de esta información genética plantea desafíos éticos y de seguridad significativos. La información genética es especialmente sensible, ya que revela detalles íntimos y únicos del individuo, y su manejo inadecuado puede vulnerar la privacidad, la confidencialidad y la dignidad del deportista. Además, la divulgación de predisposiciones genéticas puede generar discriminación o exclusión, afectando decisiones sobre contratación, participación en competencias o planificación de entrenamientos, incluso cuando el riesgo no se haya manifestado clínicamente (Collins y September, 2023).

En términos de seguridad, el almacenamiento y transferencia de datos genéticos implican riesgos elevados de filtraciones o accesos no autorizados, especialmente cuando múltiples actores intervienen en el proceso, como laboratorios, plataformas digitales y entrenadores. Esto exige protocolos de protección rigurosos, controles de acceso estrictos y el cumplimiento de normativas como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) en Europa, que establece estándares para el tratamiento de datos personales, incluida la necesidad de un consentimiento informado, el derecho a la privacidad y la posibilidad de ejercer control sobre los propios datos.



Finalmente, el uso ético de estos test requiere transparencia absoluta, educación sobre las limitaciones científicas actuales, y un marco legal y organizativo que proteja a los deportistas de posibles abusos o decisiones injustas basadas en información genética. Solo a través de un enfoque responsable, que combine rigor científico, respeto a la privacidad y principios éticos sólidos, podrá el deporte integrar estas tecnologías sin comprometer los derechos y el bienestar de quienes participan.

Tendencias emergentes en la optimización del rendimiento.

En un mundo cada vez más orientado a la productividad, la velocidad y la eficiencia, el concepto de «rendimiento» ha cobrado una relevancia sin precedentes. Ya no se trata únicamente de lograr resultados, sino de alcanzar el máximo potencial humano en todos los ámbitos posibles: físico, cognitivo, emocional y social. Esta búsqueda de optimización no es nueva; desde tiempos antiguos, culturas de todo el mundo han explorado formas de mejorar las capacidades humanas a través del entrenamiento, la alimentación, la medicina o la meditación. Sin embargo, el siglo xxi ha traído un salto cualitativo impulsado por el desarrollo tecnológico, científico y digital.

Hoy, el rendimiento no solo se mide en contextos competitivos como el deporte de élite o las finanzas corporativas, sino también en entornos como la educación, la salud, la creatividad e incluso la vida cotidiana. ¿Cómo pensar más rápido? ¿Cómo rendir mejor en el trabajo? ¿Cómo aprender en menos tiempo? Estas preguntas han dado lugar a un ecosistema global de innovación enfocado en mejorar, ampliar o acelerar las capacidades humanas, muchas veces cruzando fronteras éticas, culturales o biológicas.

Uno de los elementos clave en esta transformación es la tecnología como extensión del cuerpo y la mente. Herramientas como la inteligencia artificial, los dispositivos portables, la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV) permiten experimentar, medir y modificar el rendimiento humano con una precisión impensada hace apenas dos décadas. A ello se suma la revolución en biotecnología y genética, que abre la posibilidad de intervenir en la estructura misma del cuerpo y del cerebro, con fines no solo terapéuticos, sino también mejorativos.

Paralelamente, ha surgido una cultura del «yo cuantificado» (*quantified self*), en la que las personas utilizan dispositivos y plataformas para monitorear su sueño, nutrición, actividad física, concentración y bienestar emocional, buscando patrones que permitan ajustar su comportamiento hacia un rendimiento óptimo. Esta tendencia trasciende el interés individual: empresas, instituciones educativas y sistemas de salud están incorporando estas herramientas para evaluar y potenciar a sus integrantes, generando nuevos modelos de evaluación y desarrollo.



Sin embargo, el avance vertiginoso de estas tendencias también plantea interrogantes profundos. ¿Qué significa ser humano cuando podemos modificar nuestras capacidades de manera artificial? ¿Quién accede a estas tecnologías y con qué propósito? ¿Podría surgir una nueva forma de desigualdad basada en el acceso a mejoras tecnológicas? Estas preguntas obligan a considerar no solo las posibilidades que ofrecen estas innovaciones, sino también sus implicancias éticas, sociales y políticas.

A continuación, se explorarán las principales tendencias emergentes en la optimización del rendimiento humano, con foco en dos ámbitos clave: la tecnología inmersiva (RA/RV) y la biotecnología aplicada al mejoramiento físico y mental. También se analizarán corrientes complementarias como la neurotecnología, la inteligencia artificial personalizada, la gamificación de la productividad y la edición genética. Todo esto se enmarcará en una reflexión crítica sobre sus beneficios, riesgos y el papel de la ética en este nuevo paradigma.

La nueva era de la optimización del rendimiento

La historia de la optimización del rendimiento humano ha sido una constante en la evolución de nuestra especie. Desde la invención de herramientas rudimentarias hasta el desarrollo de complejas técnicas de entrenamiento, la humanidad siempre ha buscado mejorar sus capacidades físicas y mentales para sobrevivir y prosperar. Sin embargo, en las últimas décadas, esta búsqueda ha dado un salto sin precedentes gracias a la convergencia de varios avances tecnológicos y científicos, que han configurado una nueva era de la optimización del rendimiento.

Uno de los motores más visibles de esta transformación es la cuantificación del cuerpo y la mente. Hoy, millones de personas usan dispositivos *wearables*, como relojes inteligentes y pulseras de actividad, que registran datos sobre ritmo cardíaco, patrones de sueño, niveles de estrés, consumo calórico y movimientos. Estos dispositivos permiten un monitoreo constante y en tiempo real, ofreciendo información personalizada para ajustar hábitos y mejorar resultados. La recopilación masiva de datos no solo ayuda al individuo, sino que también alimenta algoritmos de inteligencia artificial que aprenden y adaptan recomendaciones para maximizar el rendimiento.

Paralelamente, la inteligencia artificial (IA) ha irrumpido como una herramienta poderosa para personalizar procesos y anticipar necesidades. En ámbitos laborales, existen sistemas que evalúan patrones de trabajo y sugieren pausas, cambios de tarea o métodos para optimizar la concentración. En el deporte, la IA analiza datos biométricos para diseñar entrenamientos específicos que eviten lesiones y potencien el rendimiento máximo. Esta sinergia entre datos y algoritmos está revolucionando no solo el cómo entrenamos o trabajamos, sino el modo en que entendemos nuestras propias capacidades.



Además, la cultura del *biohacking* —una filosofía que busca intervenir el cuerpo y la mente mediante tecnología, nutrición y técnicas experimentales— está ganando terreno. Desde simples prácticas como la suplementación con nootrópicos (sustancias que mejoran la función cognitiva) hasta implantes subcutáneos que registran biométricos o estimulan funciones neuronales, el *biohacking* desafía los límites tradicionales de la mejora humana. Esto está creando una nueva frontera donde lo que antes era ciencia ficción hoy es accesible para cada vez más personas.

Esta nueva era también está marcada por un enfoque interdisciplinario. El rendimiento ya no es exclusivamente responsabilidad del atleta o el profesional, sino el resultado de la interacción entre la psicología, la nutrición, la neurociencia, la ingeniería y la tecnología. Por ejemplo, el entrenamiento mental mediante técnicas de *mindfulness* o *neurofeedback* es común en deportistas de élite, y la nutrición personalizada basada en el análisis genético está ganando adeptos para mejorar la energía y la recuperación.

En los entornos corporativos, esta tendencia se traduce en una transformación profunda. Muchas empresas están adoptando programas que combinan monitorización tecnológica con coaching personalizado para elevar la productividad y el bienestar de sus empleados. Se implementan desde plataformas digitales que promueven hábitos saludables hasta entornos de realidad virtual que simulan situaciones de estrés para preparar a los trabajadores a responder de manera más eficiente.

Sin embargo, no todo es un camino de rosas. La creciente dependencia de estas tecnologías también plantea riesgos. La sobreexposición a dispositivos y datos puede generar fatiga, ansiedad o incluso un tipo de dependencia tecnológica que afecte la autonomía personal. Además, la cantidad de información recolectada plantea preocupaciones sobre la privacidad y el uso ético de los datos personales.

Esta nueva era de la optimización del rendimiento no es solo una cuestión técnica, sino también social y cultural. Cambia la forma en que nos relacionamos con nuestro propio cuerpo y mente, y redefine conceptos tradicionales como la disciplina, el esfuerzo y la capacidad humana. Comprender estas transformaciones es fundamental para navegar conscientemente este nuevo paradigma, donde la tecnología y la ciencia no solo asisten, sino que también configuran lo que somos y podemos llegar a ser.

Realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV) como potenciadores del rendimiento

La irrupción de la tecnología inmersiva, especialmente la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV), está redefiniendo la manera en que entrenamos, aprendemos y desarrollamos habilidades, abriendo un abanico de posibilidades para la optimización del rendimiento humano. Ambas tecnologías comparten la capacidad de crear entornos digitales que interactúan con nuestra percepción sensorial, pero lo hacen de formas distintas: mientras la RA superpone elementos digitales en el mundo real, la RV transporta al usuario a un entorno completamente virtual e inmersivo.



En el ámbito deportivo, estas tecnologías han comenzado a transformarse en herramientas relevantes para mejorar el rendimiento. La realidad aumentada, por ejemplo, permite a los atletas recibir información en tiempo real durante su entrenamiento, como datos biométricos, corrección postural o simulaciones de escenarios competitivos. Esto no solo mejora la calidad de la práctica, sino que también reduce riesgos de lesiones y acelera la curva de aprendizaje.

Por su parte, la realidad virtual ofrece un entorno controlado y repetible para la práctica mental y física. Los deportistas pueden sumergirse en simulaciones que recrean condiciones de competencia, desde la presión del público hasta la variabilidad climática, sin salir de su centro de entrenamiento. Esta capacidad de «entrenar la mente» ha demostrado ser útil para mejorar la concentración, la toma de decisiones bajo estrés y la recuperación psicológica.

Un ejemplo emblemático es el uso de RV para entrenar a pilotos de avión o atletas en deportes de alta precisión como el tiro o el esquí. Al practicar en un entorno virtual, es posible reproducir cientos de escenarios, permitiendo a los atletas experimentar situaciones difíciles o inusuales sin los riesgos inherentes a la práctica real. De esta forma, la realidad virtual actúa como un **simulador cognitivo y físico** que potencia habilidades esenciales para el alto rendimiento.

La medicina es otro campo donde estas tecnologías están revolucionando el rendimiento profesional y los resultados para los pacientes. En cirugía, la RA permite a los médicos superponer imágenes anatómicas en tiempo real durante procedimientos complejos, facilitando la precisión y reduciendo errores. Esto tiene un impacto directo en la optimización del rendimiento quirúrgico y la recuperación postoperatoria.

Además, la RV se usa para la formación médica, ofreciendo a estudiantes y profesionales la posibilidad de practicar técnicas invasivas en un entorno seguro y controlado. Esta formación inmersiva acelera la adquisición de habilidades y mejora la retención de conocimientos, elevando el estándar general del desempeño clínico. En rehabilitación, la combinación de RA y RV ha demostrado ser eficaz para acelerar la recuperación motora y cognitiva en pacientes con lesiones cerebrales, accidentes cerebrovasculares o trastornos neurodegenerativos. Al utilizar entornos virtuales personalizados, los terapeutas pueden diseñar ejercicios específicos que estimulan áreas del cerebro y fomentan la neuroplasticidad, optimizando así el proceso de rehabilitación.

Más allá del deporte y la medicina, la RA y la RV están transformando la educación y la formación profesional. Los entornos virtuales permiten crear experiencias de aprendizaje inmersivas y altamente personalizadas, que aumentan la retención y motivación de los estudiantes.

En las escuelas y universidades, la realidad virtual se utiliza para simular entornos complejos —desde exploraciones científicas hasta recreaciones históricas— que



fomentan una comprensión profunda y vivencial de los contenidos. Los alumnos no solo acceden a información, sino que interactúan con ella, lo que mejora significativamente el aprendizaje y el rendimiento académico.

En el ámbito corporativo, las empresas emplean RA y RV para entrenar habilidades técnicas y blandas. Por ejemplo, las simulaciones en RV preparan a los empleados para enfrentar situaciones de crisis, mejorar la comunicación o manejar maquinaria peligrosa, todo en un entorno seguro y controlado. Esto no solo optimiza la capacitación, sino que reduce costos y tiempos de aprendizaje.

Una tendencia emergente vinculada a RA y RV es la utilización de **videojuegos serios** —diseñados con fines terapéuticos, educativos o de entrenamiento— que aprovechan las capacidades inmersivas para mejorar funciones cognitivas, motrices y emocionales. Estos juegos, al combinar desafíos adaptativos con feedback inmediato, promueven la neuroplasticidad y la mejora del rendimiento en áreas como la memoria, la atención y la coordinación motora.

Por ejemplo, pacientes con trastornos de atención o lesiones cerebrales han mostrado avances significativos tras usar juegos en realidad virtual que estimulan la concentración y la planificación. Deportistas, a su vez, pueden mejorar la precisión y velocidad de sus movimientos gracias a ejercicios gamificados en entornos virtuales.

A pesar de su gran potencial, la adopción masiva de RA y RV enfrenta varios desafíos. Primero, la **fatiga cognitiva** y física pueden ser un problema, ya que la inmersión prolongada exige un esfuerzo mental intenso y puede generar mareos o malestar. Esto limita el tiempo efectivo de uso y requiere un diseño cuidadoso de las experiencias.

Además, los costos de implementación y mantenimiento de estas tecnologías aún son elevados, lo que restringe su acceso principalmente a instituciones grandes o sectores específicos. La curva de aprendizaje tecnológica también puede ser un obstáculo para ciertos usuarios, sobre todo en poblaciones menos familiarizadas con dispositivos digitales.

Por último, existe un riesgo de dependencia excesiva en entornos virtuales, que podría afectar la capacidad de adaptación a situaciones reales. El equilibrio entre el entrenamiento inmersivo y la experiencia práctica sigue siendo un tema abierto y fundamental para maximizar beneficios sin perder conexión con el mundo tangible.

Biotechnología y mejoras genéticas

La biotecnología y las mejoras genéticas representan una de las fronteras más disruptivas y debatidas en la optimización del rendimiento humano. A diferencia de las tecnologías externas, como la realidad aumentada o virtual, estas intervenciones actúan directamente sobre el cuerpo y el genoma, lo que permite no solo mejorar funciones



específicas, sino también modificar la base biológica del individuo. Este enfoque abre un abanico de posibilidades amplias, pero también plantea interrogantes éticos y sociales profundos.

El *biohacking*, en su sentido más amplio, abarca desde prácticas simples y accesibles hasta experimentos de alta tecnología. En su nivel más básico, puede incluir la optimización de la dieta, la suplementación con nutrientes específicos y el uso de técnicas como el ayuno intermitente para favorecer la energía, la concentración y la longevidad. En su expresión más avanzada, el *biohacking* implica la integración de tecnología dentro del cuerpo, como implantes de chips *RFID* que permiten abrir puertas o almacenar datos biométricos, o dispositivos que estimulan eléctricamente los nervios para mejorar funciones cognitivas o musculares.

Este movimiento, que ha ganado visibilidad en comunidades de entusiastas y en algunos círculos científicos, busca empoderar a las personas para que tomen el control activo sobre su biología, promoviendo una mejora continua y personalizada. La combinación de datos genéticos, *biofeedback* y dispositivos implantables está generando nuevas formas de autooptimización, aunque aún en fases iniciales y con riesgos asociados.

En el campo clínico, las terapias genéticas han mostrado un progreso impresionante en el tratamiento de enfermedades hereditarias y degenerativas. Sin embargo, el potencial para utilizarlas con fines de mejora en deporte está en expansión y plantea serios problemas éticos como el dopaje. El dopaje genético implica modificar, de manera reversible o irreversible, cómo funcionan los genes en el cuerpo para mejorar el rendimiento físico, y es definido por la Agencia Mundial Antidopaje (WADA) como el uso no terapéutico de células, genes o elementos genéticos para potenciar capacidades atléticas.

Aunque no hay evidencia de su uso extendido, las tecnologías para hacerlo existen, basadas en técnicas de terapia génica que originalmente buscan corregir enfermedades mediante la inserción o modificación de ADN en células, ya sea *in vivo* (directamente en el cuerpo) o *ex vivo* (modificando células fuera del cuerpo y reintroduciéndolas). Algunos genes investigados para mejorar el rendimiento incluyen *PPAR delta*, que en estudios con ratones aumentó fibras musculares y resistencia; IGF-1, que favorece la reparación muscular, aunque podría elevar el riesgo de cáncer; y genes relacionados con la producción de EPO, cuyo aumento natural puede evadir los controles antidopaje. Detectar estas modificaciones es extremadamente difícil, lo que ha llevado a la WADA a considerar la secuenciación genómica completa de atletas como estrategia preventiva contra el dopaje.

Una técnica especialmente preocupante es CRISPR/Cas9, que permite editar el genoma con una precisión comparable a un «corta y pega» y resulta casi indetectable. Esto ha abierto un debate sobre si el dopaje genético podrá alguna vez ser controlado



eficazmente, dado que solo sería posible detectar modificaciones si se cuenta con una muestra genética previa al inicio de la carrera deportiva del atleta.

Como se ha comentado, estas posibilidades no están exentas de controversia. La manipulación genética, en especial cuando afecta la línea germinal (es decir, los genes que se transmiten a futuras generaciones), plantea dilemas éticos profundos sobre la «creación» de seres humanos mejorados, el consentimiento informado y la posible aparición de desigualdades biológicas entre quienes acceden a estas tecnologías y quienes no.

En definitiva, las mejoras biotecnológicas presentan desafíos éticos y sociales que deben ser considerados cuidadosamente. El riesgo de crear una élite biotecnológica, con ventajas genéticas sobre el resto de la población, puede aumentar las desigualdades y generar tensiones sociales. Además, la presión para mejorar genéticamente podría afectar la autonomía individual, imponiendo estándares de rendimiento poco realistas o inseguros.

También están los riesgos técnicos: la edición genética puede tener efectos secundarios imprevistos, generar mutaciones no deseadas o afectar la biodiversidad genética humana. La falta de regulación internacional clara y uniforme añade un nivel de incertidumbre, que puede abrir la puerta a usos irresponsables o no éticos.

Además de las mejoras directas, la biotecnología ofrece soluciones para optimizar el rendimiento a través de la prevención y rehabilitación. Por ejemplo, la identificación genética de predisposiciones a lesiones permite diseñar entrenamientos personalizados que minimicen riesgos. Asimismo, terapias basadas en células madre y nanotecnología aceleran la recuperación de tejidos dañados, permitiendo a los atletas volver más rápido a sus niveles óptimos.

Estos avances no solo benefician al deporte de alto rendimiento, sino que también tienen aplicaciones en la población general, mejorando la calidad de vida y la capacidad funcional durante más años.

Referencias

Burns, A., & Collins, D. (2023). Interdisciplinary practice in performance sport: a scoping review of evidence of collaboration. *European Journal of Sport Science*, 23(9), 1877–1891. <https://doi.org/10.1080/17461391.2023.2201812>

Collins, A., & Collins, D. (2012). Culture change in elite sport performance teams: Examining and advancing effectiveness in the new era. *Journal of Applied Sport Psychology*, 24(3), 338–355. [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)+8[researchgate.net](https://www.researchgate.net)+8[scirp.org](https://www.scirp.org)+8



- Collins, M., & September, A. V.** (2023). Are commercial genetic injury tests premature? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 33(9), 1584–1597. <https://doi.org/10.1111/sms.14483>
- Ekstrand, J., Lundqvist, D., Davison, M.** (2018). Communication quality between the team doctor and head coach is associated with injury burden and player availability in elite football clubs. *British Journal of Sports Medicine*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099411>
- González, J. R., Cáceres, A., Ferrer, E., Balagué-Dobón, L., Escribà-Montagut, X., Sarrat-González, D., Quintás, G., & Rodas, G.** (2024). Predicting injuries in elite female football players with Global-Positioning-System and multiomics data. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 19(7), 661–669. <https://doi.org/10.1123/ijssp.2023-0184>
- Kalkhoven, J. T.** (2024). Athletic injury research: Frameworks, models and the need for causal knowledge. *Sports Medicine*, 54(5), 1121–1137. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02008-1>
- Leckey, C., van Dyk, N., Doherty, C., Lawlor, A., & Delahunt, E.** (2024). Machine learning approaches to injury risk prediction in sport: A scoping review with evidence synthesis. *British Journal of Sports Medicine*, 59(7), 491–500. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108576>
- McCalla, T., & Fitzpatrick, S.** (2016). Integrating sport psychology within a high-performance team: potential stakeholders, micropolitics and culture. *Journal of Sport Psychology in Action*, 7(1), 33–42
- Rollo, I., Carter, J. M., Close, G. L., Yangüas, J., Gomez-Diaz, A., Medina Leal, D., Duda, J. L., Holohan, D., Erith, S. J., & Podlog, L.** (2021). Role of sports psychology and sports nutrition in return to play from musculoskeletal injuries in professional soccer: an interdisciplinary approach. *European Journal of Sport Science*, 21(7), 1054–1063. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1792558>
- Reilly, T., Williams, A. M., Nevill, A., & Franks, A.** (2000). A multidisciplinary approach to talent identification in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 695–702. <https://doi.org/10.1080/02640410050120078>
- Ribans, P., Smith, J. A., Lee, T., & Moreno, C.** (2022). Ethical considerations in the use of direct-to-consumer genetic testing for injury risk in athletes. *International Journal of Sports Ethics*, 12(3), 145–157.
- Sporer, B. C., & Windt, J.** (2018). Integrated performance support: facilitating effective and collaborative performance teams. *British Journal of Sports Medicine*, 52(16), 1014–1015. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097646>



