

Módulo 4. *Wearables* para VFC, DFA-alpha1 y pulso

Tecnología para medición de VFC y DFA-alpha1

Dispositivos y sensores para la medición de VFC

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) se ha consolidado como una de las herramientas no invasivas más útiles para monitorizar la respuesta del sistema nervioso autónomo ante el entrenamiento, el estrés, la fatiga y los procesos de recuperación. Su utilidad radica en que permite estimar el equilibrio entre la rama simpática (activación) y la parasimpática (recuperación) del sistema nervioso autónomo a través del análisis de los intervalos entre latidos (RR).

Tradicionalmente, la medición de la VFC requería equipos de electrocardiografía (ECG), pero los avances en tecnología *wearable* han permitido su medición mediante sensores ópticos PPG (fotopletismografía) o bandas de pecho con precisión de ECG, integrando esta métrica en dispositivos de uso cotidiano por deportistas.

Entre los dispositivos más utilizados y validados, se encuentran los siguientes:

- Bandas de pecho con registro de RR de alta precisión, como Movesense, Polar H10, Garmin HRM-Pro o Wahoo TICKR-X, que permiten grabar intervalos RR sin errores significativos y sincronizar los datos con *apps* de análisis.
- Relojes deportivos avanzados (como Garmin, Suunto, Polar, Apple Watch), que integran sensores ópticos para estimar la VFC, aunque con menor fiabilidad durante movimientos intensos.
- *Wearables* dedicados a la recuperación, como Oura Ring, RingConn o WHOOP Strap, que estiman la VFC durante el sueño para generar indicadores de «readiness» o preparación para el entrenamiento.

Bandas de pecho vs. sensores ópticos

Las bandas de pecho siguen siendo la referencia para la medición de la VFC, especialmente cuando buscamos un análisis preciso en condiciones de reposo, durante el ejercicio o en sesiones de análisis de umbral. Ofrecen una captación de señal eléctrica directa y una fidelidad temporal que permite realizar análisis no lineales, espectrales y estadísticos de alta resolución.

Por otro lado, los sensores ópticos, que miden las oscilaciones de volumen sanguíneo en la piel mediante luz, constituyen una alternativa cómoda y sin necesidad de contacto torácico. Sin embargo, su fiabilidad está condicionada por varios factores:

- El movimiento del usuario (menor precisión durante actividad intensa).
- La calidad de la perfusión cutánea (temperatura, tono de piel).
- La posición del sensor (muñeca, dedo, brazo).

En consecuencia, aunque los sensores ópticos son útiles para el seguimiento diario y el análisis nocturno, la evaluación detallada de la VFC en contextos de entrenamiento requiere preferentemente el uso de bandas de pecho validadas.

Precisión y confiabilidad

La precisión de las mediciones de la VFC depende del dispositivo, del *software* utilizado para el análisis y del contexto en que se realiza la medición. Estudios recientes muestran lo siguiente:

- Las bandas de pecho, como Polar H10 o Garmin HRM-Pro, presentan errores de menos del 2 % respecto al ECG en reposo.
- Los sensores ópticos tienen mayor error absoluto medio (MAE), especialmente durante el ejercicio dinámico, aunque ofrecen resultados aceptables durante el sueño o en reposo matutino.
- Los dispositivos que permiten la exportación de datos RR en formato sin procesar (.txt, .csv, .fit) posibilitan realizar análisis avanzados con herramientas científicas como Kubios HRV.

La confiabilidad también está determinada por la consistencia en la toma de datos: mismo horario, posición, respiración controlada y condiciones ambientales estables.

Aplicaciones móviles y *software* de análisis de datos cardíacos

La expansión del ecosistema digital ha impulsado el desarrollo de numerosas aplicaciones y plataformas especializadas en el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), tanto para uso personal como profesional. Estas herramientas permiten capturar, visualizar e interpretar datos fisiológicos con un nivel de precisión y accesibilidad sin precedentes. A continuación, se presentan algunas de las soluciones más destacadas:

- **HRV4Training:** aplicación centrada en el registro matutino de la VFC utilizando la cámara del *smartphone* o una banda torácica. Ofrece análisis de tendencias,



puntuaciones de recuperación y recomendaciones para ajustar la carga de entrenamiento.

- **Elite HRV:** diseñada para entrenadores, atletas y profesionales de la salud, permite realizar evaluaciones individuales, análisis longitudinales y estudios de respuesta al estrés y a la carga fisiológica.
- **Kubios HRV:** *software* de referencia en investigación científica. Proporciona análisis avanzados, incluyendo medidas espectrales (LF, HF), no lineales (Poincaré, ApEn, SampEn) y comparaciones entre series temporales. Su precisión lo convierte en una herramienta clave en entornos académicos y clínicos.
- **Oura y WHOOP:** plataformas comerciales integradas que monitorizan la VFC nocturna junto con otros parámetros como la temperatura, el sueño y la actividad física. Generan índices compuestos de preparación («readiness») que orientan la toma de decisiones en torno al rendimiento y la recuperación.
- *sciencepeaks:* plataforma basada en inteligencia artificial, diseñada para el monitoreo personalizado de la VFC en contextos clínicos y deportivos. Su principal aplicación clínica se centra en el seguimiento de pacientes con cáncer de mama, facilitando la detección y gestión de la fatiga mediante análisis longitudinales y alertas proactivas. Además, en contextos deportivos, permite monitorizar la VFC antes y después del entrenamiento, ofreciendo información detallada sobre la respuesta autonómica al esfuerzo, la recuperación aguda y posibles signos de sobrecarga. La integración con múltiples dispositivos portables y su enfoque modular la hacen útil tanto para investigación como para intervenciones personalizadas en salud y rendimiento.

En la siguiente tabla se presentan las principales características de algunos de los dispositivos más utilizados para medir la VFC, con información sobre su tipo de sensor, nivel de precisión, aplicaciones recomendadas, limitaciones y rango de precio estimado.



Tabla 1. Comparación de dispositivos para la medición de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

Dispositivo	Tipo de sensor	Precisión en RR	Aplicación ideal	Limitaciones	Precio aproximado
Polar H10	Banda de pecho ECG	Alta (<2% error)	Entrenamiento, investigación	Necesita contacto torácico	Medio (\$80-\$100)
Movesense	Banda de pecho ECG	Alta (<2% error)	Nuevos desarrollos, entrenamiento, investigación	Necesita contacto torácico	Medio (\$80-\$120)
Garmin HRM-Pro	Banda de pecho ECG	Alta (<2% error)	Entrenamiento, análisis de umbrales	Necesita contacto torácico	Medio (\$90-\$120)
Apple Watch	Sensor óptico PPG	Moderada	Uso diario, seguimiento general	Menor precisión en ejercicio intenso	Alto (\$350-\$500)
Oura Ring	Sensor óptico PPG	Moderada	Recuperación y sueño	Limitado en deporte activo	Alto (\$300-\$400)
WHOOP Strap	Sensor óptico PPG	Moderada	Seguimiento continuo	Suscripción mensual	Medio-Alto (\$200 + suscripción)

Fuente: elaboración propia

Herramientas para interpretación de VFC y DFA-alpha1

Además de la VFC clásica —basada en análisis estadísticos y espectrales—, en los últimos años se ha popularizado el uso del DFA-alpha1 (*detrended fluctuation analysis*) como herramienta para estimar umbrales de carga y fatiga a partir del comportamiento no lineal de los intervalos RR.



El DFA-alpha1 mide el grado de correlación en la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Su valor disminuye a medida que aumenta la intensidad del ejercicio. A continuación, se describen los rangos más comunes:

- **Valores superiores a 1.0.** Actividad muy ligera o reposo (alta complejidad autonómica).
- **Valores entre 0.75 y 0.5.** Actividad moderada, zona aeróbica.
- **Valores inferiores a 0.5.** Actividad de alta intensidad, predominancia simpática.

Tabla 2. Rangos para DFA-alpha1 y su interpretación

Rango DFA-alpha1	Estado fisiológico	Implicación práctica
> 1.0	Reposo / actividad ligera	Alta complejidad y equilibrio autonómico
0.75 – 1.0	Actividad ligera a moderada	Zona aeróbica, equilibrio aún bueno
0.5 – 0.75	Ejercicio moderado a intenso	Inicio de predominancia simpática
< 0.5	Ejercicio intenso / fatiga	Predominancia simpática, fatiga elevada

Fuente: elaboración propia

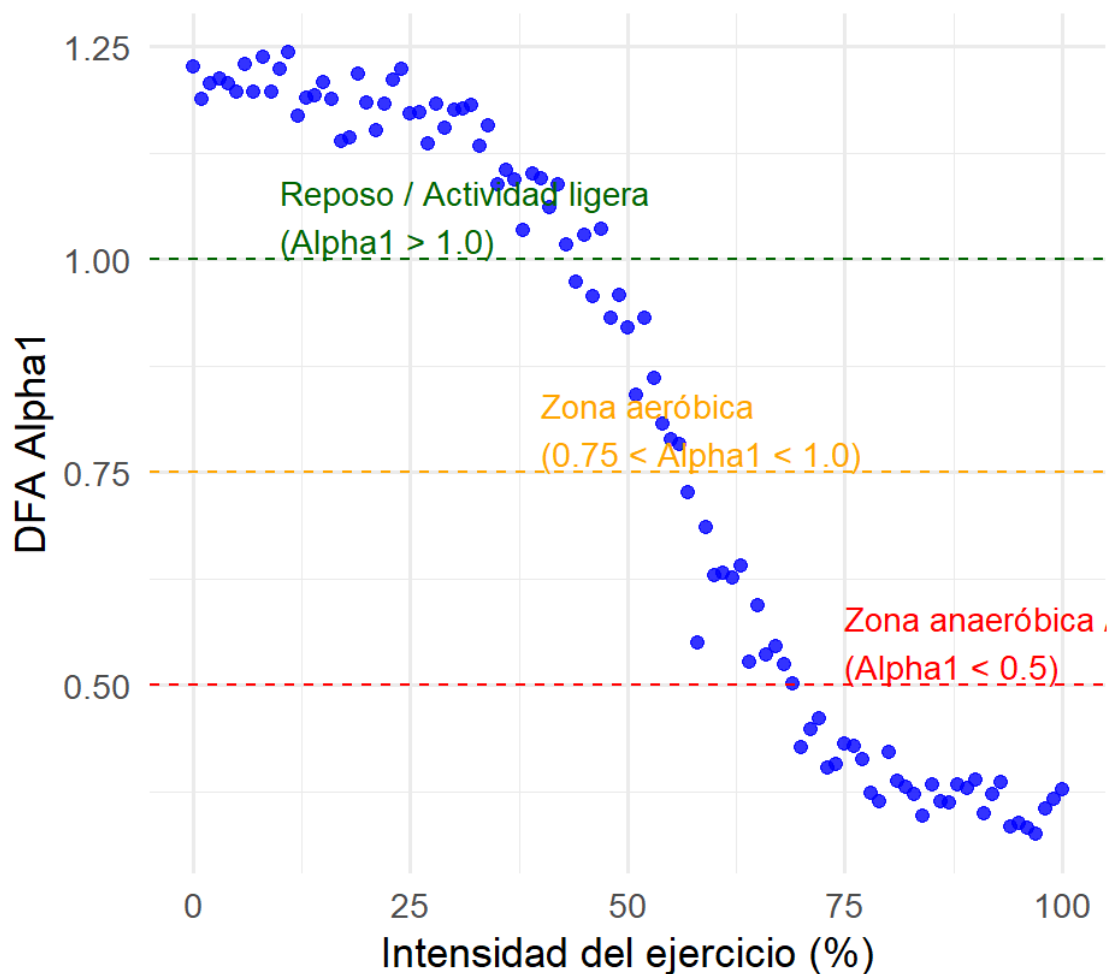
La principal aplicación práctica del DFA-alpha1 es la estimación del umbral aeróbico, también denominado primer umbral de lactato (LT1) o ventilatorio (VT1), el cual se correlaciona con una caída del DFA-alpha1 por debajo de 0.75. Si bien se ha propuesto que el valor de 0.5 podría asociarse con el umbral anaeróbico (LT2 o VT2), esta relación aún no es concluyente y falta establecer un modelo preciso para estimarlo mediante esta métrica. No obstante, el uso del DFA-alpha1 permite identificar zonas de entrenamiento sin necesidad de mediciones de lactato ni pruebas invasivas.

La figura 1 muestra la evolución del índice DFA-alpha1 en función de la intensidad del ejercicio (expresada como porcentaje del máximo teórico), representada mediante puntos individuales que simulan la variabilidad fisiológica real observada en registros de intervalo RR. Se observa una tendencia descendente: valores altos de alpha1 (>1.0) se



asocian con estados de reposo o actividad muy ligera, reflejando una alta complejidad del control autonómico. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, el DFA-alpha1 disminuye progresivamente, cruzando el umbral de 0.75 —indicador propuesto del umbral aeróbico— y alcanzando valores inferiores a 0.5 en zonas de alta intensidad, donde predomina la activación simpática. Las líneas horizontales punteadas delimitan estas zonas fisiológicas, lo que permite una interpretación visual clara y útil para aplicaciones en entrenamiento y control de la carga.

Figura 1. Relación entre la intensidad del ejercicio y el índice DFA-alpha1 en una situación simulada



Fuente: elaboración propia

Herramientas como Runalyze, Athlytic, Fatmaxxer o sciencepeaks han incorporado de manera innovadora el análisis de DFA-alpha1, permitiendo tanto el procesamiento en tiempo real como en modo diferido a partir de datos de frecuencia cardíaca recogidos mediante bandas torácicas validadas. Estas soluciones han contribuido significativamente a democratizar el acceso a métricas avanzadas de fisiología del

ejercicio que, hasta hace pocos años, estaban restringidas a entornos clínicos o de investigación.

En el caso de Runalyze, se trata de una plataforma web centrada en el análisis detallado del entrenamiento, con énfasis en métricas fisiológicas longitudinales. A través de la carga de archivos .fit o .tcx procedentes de dispositivos compatibles (Garmin, Suunto, Polar, etc.), la plataforma permite visualizar la evolución del DFA-alpha1 durante una sesión y detectar puntos críticos, como el descenso por debajo del umbral de 0.75, propuesto como estimador no invasivo del umbral aeróbico. Este enfoque permite al usuario identificar zonas de entrenamiento efectivas y evitar sobreesfuerzos innecesarios.

Fatmaxxer es una aplicación de desarrollo comunitario centrada en el cálculo del DFA-alpha1 en tiempo real durante el ejercicio. Es compatible con Android y dispositivos que transmiten intervalos RR mediante Bluetooth, como las bandas Polar H10 o Garmin HRM-Pro. Su principal ventaja radica en la capacidad de ofrecer retroalimentación inmediata sobre la zona fisiológica en la que se encuentra el atleta, facilitando sesiones de entrenamiento basadas en la modulación autonómica más que en parámetros mecánicos o subjetivos. Esto resulta especialmente útil en trabajos de baja intensidad, donde es clave mantener una carga controlada para favorecer adaptaciones aeróbicas sin generar fatiga innecesaria.

Por su parte, Athlytic se integra con el ecosistema Apple (Apple Watch y HealthKit) para ofrecer análisis diarios de VFC y carga fisiológica, incluyendo estimaciones de DFA-alpha1 derivadas de datos nocturnos y de entrenamiento. Aunque su precisión depende de la calidad de los datos ópticos, su interfaz intuitiva y sus informes de recuperación lo hacen atractivo para usuarios que priorizan comodidad y continuidad.

Finalmente, sciencepeaks representa una solución más avanzada y personalizada, con capacidades de análisis longitudinal, alertas inteligentes y un enfoque tanto deportivo como clínico. Su integración con múltiples dispositivos *wearables* y su capacidad de análisis retrospectivo permiten utilizar el DFA-alpha1 como indicador de carga, recuperación y adaptación en atletas y pacientes.

Funcionalidades y usabilidad

Los dispositivos y plataformas actuales han mejorado significativamente la usabilidad de la VFC en el deporte, eliminando barreras técnicas y facilitando su aplicación práctica. Entre sus funciones más relevantes, se incluyen las siguientes:

- Registro automatizado cada mañana (modo «*morning readiness*»).
- Alertas de cambio significativo respecto del valor basal.

- Integración con plataformas de entrenamiento como TrainingPeaks o Final Surge.
- Sugerencias personalizadas para ajustar la carga: disminuir, mantener o aumentar.
- Análisis de tendencias semanales o mensuales.
- Monitoreo de la VFC antes y después del entrenamiento.

Esto permite utilizar la VFC no como una métrica aislada, sino como un indicador longitudinal de adaptación al entrenamiento, estado de recuperación y necesidad de ajuste.

Integración con plataformas de entrenamiento

Cada vez más entrenadores y atletas incorporan la información de la VFC y del DFA-alpha1 en sus plataformas de gestión de carga, lo que permite:

- correlacionar la VFC con el rendimiento (potencia, velocidad, ritmo) y la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE);
- detectar precozmente signos de carga excesiva o sobreentrenamiento;
- ajustar los microciclos en función de la recuperación fisiológica y no solo del plan teórico;
- identificar cómo responden diferentes tipos de sesiones (HIIT, polarizado, *sweet spot*) al estrés autonómico.

Además, en deportes de equipo, se están empezando a implementar sistemas de VFC grupal para detectar tendencias colectivas de fatiga o de respuesta a la carga.

Sincronización con programas y rutinas

El valor real de la VFC no reside en un número aislado, sino en su contextualización dentro del programa de entrenamiento y la rutina diaria del deportista. Por eso, es fundamental:

- tomar los registros siempre en las mismas condiciones (horario, postura, respiración);
- utilizar series de días (media móvil de 7 días, por ejemplo) en lugar de valores puntuales;
- interpretar los cambios a la luz del contexto (viajes, estrés, enfermedad, sueño).



Cuando se combina con datos de sueño, carga externa, nutrición y percepción subjetiva, la VFC se convierte en un marcador útil de adaptación o descompensación.

Análisis longitudinal del rendimiento

La acumulación de datos de VFC y DFA-alpha1 a lo largo de semanas y meses permite detectar patrones adaptativos y guiar decisiones estratégicas en el entrenamiento. Este tipo de análisis facilita determinar el momento oportuno para introducir una carga intensiva o una fase regenerativa, así como identificar qué tipo de estímulo genera una mejor respuesta autonómica en cada individuo. También permite observar qué deportistas presentan una mayor tolerancia al estrés o, por el contrario, una recuperación más lenta. En contextos de planificación a largo plazo, el análisis longitudinal resulta clave para personalizar la progresión, reducir el riesgo de lesiones y aumentar la eficiencia del estímulo.

Innovaciones en la medición de DFA-alpha1

El uso del DFA-alpha1 como indicador de umbral aeróbico ha ganado interés en la literatura científica reciente, ya que permite:

- estimar el umbral de transición aeróbico-anaeróbico de forma no invasiva;
- realizar test submáximos con bajo coste y sin necesidad de laboratorio;
- obtener valores útiles en actividades de campo (carrera, ciclismo, remo).

Para ello, es indispensable contar con una banda de pecho con alta precisión RR y utilizar *software* específico como Kubios HRV, Runalyze o Fatmaxxer. Además, se están desarrollando algoritmos que permiten el cálculo en tiempo real, integrados en relojes deportivos o aplicaciones móviles, lo que facilitará su implementación masiva en el futuro cercano.

Desarrollo de algoritmos y métodos no invasivos

La mejora en la capacidad de cálculo de los *wearables*, junto con el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial, está revolucionando el campo del análisis fisiológico aplicado al deporte, la salud y el bienestar. Estos avances permiten una monitorización más precisa del sistema nervioso autónomo, pero también abren paso a un nuevo paradigma: un entrenamiento totalmente personalizado, adaptativo y predictivo, basado en datos fisiológicos individuales interpretados mediante modelos inteligentes. Este enfoque permite detectar estados de fatiga, estimar zonas de entrenamiento en tiempo real y anticipar respuestas a futuras cargas, con una precisión que era impensable hace apenas una década.

Los algoritmos de inteligencia artificial, especialmente aquellos basados en aprendizaje automático, han demostrado ser capaces de extraer patrones complejos en los datos generados por dispositivos como bandas de pecho, anillos inteligentes, relojes deportivos y sensores ópticos. A diferencia de los métodos tradicionales, que requerían reglas explícitas, estos modelos aprenden directamente de los datos: identifican correlaciones no evidentes entre la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la calidad del sueño, la carga de entrenamiento y la percepción subjetiva del esfuerzo. Esto los convierte en herramientas fundamentales para el diseño de programas de entrenamiento realmente individualizados, que tienen en cuenta la evolución fisiológica específica de cada persona.

Un aspecto particularmente innovador es el uso de inteligencia artificial para reconocer estados fisiológicos a partir de señales sutiles y, a menudo, invisibles para el ojo humano. Gracias al entrenamiento de modelos con miles o millones de datos, hoy en día es posible detectar con alta precisión condiciones como fatiga aguda, desequilibrio autonómico, alteraciones del sueño o incluso infecciones en fases tempranas. Por ejemplo, algunos modelos comerciales han logrado identificar la infección por COVID-19 antes de la aparición de síntomas, solo mediante el análisis de la VFC, la temperatura y la frecuencia respiratoria nocturna. Estos sistemas no se basan en umbrales fijos, sino que se adaptan al contexto individual de cada usuario, haciendo que las decisiones sean más personalizadas y efectivas.

La inteligencia artificial también está transformando la interpretación del DFA-alpha1. Aunque este indicador ya ofrece por sí solo un valioso marcador de carga interna, la IA permite contextualizarlo de forma dinámica. Por ejemplo, si el valor del alpha1 cae rápidamente al inicio de una sesión, un sistema basado en IA puede detectar una posible fatiga acumulada y recomendar una modificación inmediata del plan. Además, los modelos pueden ajustar automáticamente el punto de corte del alpha1 según las condiciones del deportista: un mismo valor puede tener significados diferentes si se ha dormido mal, si hay estrés acumulado o si se ha entrenado con alta carga en los días previos. Esto convierte un análisis estático en uno realmente vivo, adaptado y proactivo.

Uno de los campos con mayor potencial es la predicción de respuestas fisiológicas futuras. Algunos modelos ya son capaces de anticipar la recuperación tras una sesión específica, estimar el riesgo de lesión si se continúa con una determinada carga o incluso predecir la tolerancia a entrenamientos futuros en función del historial reciente. Esto se logra mediante el entrenamiento de algoritmos supervisados con múltiples variables: VFC, sueño, nutrición, ritmo cardíaco, RPE, lactato estimado, entre otras. El resultado es un sistema que no solo analiza, sino que también anticipa, recomendando si conviene aumentar, mantener o reducir la carga del día, y con qué tipo de entrenamiento.

Una ventaja añadida de los modelos actuales es su capacidad de aprendizaje continuo. A medida que el sistema recopila más datos de un usuario, mejora su precisión. Esto



significa que los algoritmos no solo aprenden de una base de datos global, sino que también se especializan en el individuo. Con el tiempo, las recomendaciones son cada vez más precisas y adaptadas a los ritmos personales. Además, con técnicas de inteligencia artificial explicable, los sistemas están comenzando a ofrecer transparencia: es posible visualizar por qué se ha tomado una determinada decisión, qué variables influyeron más y cuál fue el nivel de confianza del modelo. Esta transparencia es clave tanto para la confianza del usuario como para la colaboración entre humanos y máquinas.

Por supuesto, la aplicación de inteligencia artificial en contextos deportivos y de salud plantea desafíos éticos importantes. El tratamiento y la protección de datos biométricos debe ser extremadamente riguroso, especialmente cuando se integran múltiples fuentes de información. Es imprescindible garantizar que los algoritmos respeten la privacidad, que los datos sean anonimizados cuando corresponda y que siempre exista una opción de consentimiento informado. Además, es fundamental que el usuario mantenga el control sobre sus decisiones, utilizando la inteligencia artificial como una herramienta de apoyo y no como un sustituto completo de su autonomía.

El futuro próximo traerá consigo la aparición de entrenadores virtuales capaces de ajustar sesiones en tiempo real, modelos que simulan cómo reaccionará el cuerpo ante diferentes tipos de carga y plataformas que permitan una verdadera colaboración entre humanos y algoritmos. En este contexto, se espera una integración aún mayor con tecnologías como la realidad aumentada, sistemas de *biofeedback* en tiempo real y sensores cerebrales no invasivos. La sinergia entre inteligencia artificial y fisiología humana está apenas comenzando a desplegar todo su potencial, y lo que hoy parece sofisticado, mañana será lo habitual.

La tabla 3 presenta ejemplos reales de plataformas actuales que integran inteligencia artificial para analizar datos de VFC, DFA-alpha1 y otras métricas fisiológicas.

Tabla 3. Ejemplos de plataformas con IA aplicadas a fisiología del entrenamiento

Plataforma	Funcionalidad principal con IA	Tipo de dispositivo compatible	Aplicación destacada
sciencepeaks	Análisis autónomo y personalizado de predicción de carga	Bandas validadas, <i>wearables</i> , sensores ópticos	Seguimiento de recuperación y fatiga aplicada a pacientes con cáncer y ciclistas.



Fatmaxxer	Estimación de umbrales con DFA-alpha1 y predicción de rendimiento	Garmin HRM, Polar H10	Identificación de zonas aeróbicas.
WHOOP	Modelos multivariantes de recuperación y fatiga.	WHOOP Strap	<i>Readiness score</i> personalizado.
Oura	Análisis de sueño y estrés mediante IA.	Oura Ring	Predicción de rendimiento y descanso.
Athlytic	Interpretación del DFA Alpha1 + sueño + carga externa	Apple Watch	Ajustes diarios de entrenamiento.
Garmin (Firstbeat)	Modelos de carga y estrés fisiológico integrados	Relojes Garmin con sensor óptico o banda	Recomendaciones de recuperación activas.

Fuente: elaboración propia

Validación científica

La utilidad práctica del análisis de diferentes marcadores de VFC se sostiene sobre una base sólida de validación científica acumulada a lo largo de más de dos décadas. Su creciente adopción en entornos de entrenamiento, medicina deportiva y salud general no es resultado del entusiasmo tecnológico, sino de una acumulación consistente de evidencia empírica que ha demostrado su sensibilidad, fiabilidad y aplicabilidad en la monitorización del sistema nervioso autónomo y de la carga interna. En particular, la VFC ha sido estudiada extensamente como marcador de equilibrio autónomo y como indicador sensible a diversos estresores fisiológicos y psicológicos, mientras que el DFA-alpha1 ha emergido más recientemente como un marcador dinámico capaz de reflejar transiciones metabólicas relevantes durante el ejercicio físico.

Numerosos estudios han confirmado que la VFC, especialmente en medidas obtenidas en reposo y en condiciones estandarizadas (como por la mañana al despertar), se correlaciona de forma clara con el estado de carga fisiológica del individuo. Por ejemplo,



valores reducidos de RMSSD o HF (componentes vagales de la VFC) se han asociado sistemáticamente con fatiga acumulada, falta de sueño, enfermedad incipiente y sobreentrenamiento. Esta relación se ha observado tanto en atletas de élite como en deportistas recreativos, y ha sido replicada en múltiples deportes, incluyendo ciclismo, triatlón, fútbol, remo y deportes de resistencia. Los descensos sostenidos en la VFC preceden o acompañan períodos de fatiga funcional y bajo rendimiento, lo cual refuerza su valor como herramienta de alerta temprana.

Además, investigaciones longitudinales han demostrado que el uso continuo de la VFC puede mejorar la planificación del entrenamiento al permitir un ajuste más preciso de las cargas diarias. Un ejemplo es el estudio de Manresa-Rocamora et al. (2022), en el que un grupo de atletas entrenó con un enfoque clásico y otro grupo lo hizo guiado por sus valores de VFC. Los resultados mostraron que el grupo que ajustó su entrenamiento en función de la VFC alcanzó mejoras equivalentes en el rendimiento aeróbico, pero con menor incidencia de fatiga y mejor recuperación subjetiva. Este hallazgo ha sido replicado, con pequeñas variaciones, en diferentes contextos, lo que respalda el valor de la VFC no solo como indicador pasivo, sino como herramienta activa de toma de decisiones.

Por su parte, el DFA-alpha1 ha ganado notoriedad como marcador dinámico de complejidad autonómica durante el ejercicio, permitiendo inferir el grado de activación simpática y parasimpática en tiempo real. A diferencia de la VFC en reposo, que refleja el tono autonómico basal, el DFA-alpha1 mide la pérdida progresiva de correlación fractal en los intervalos RR conforme aumenta la intensidad del ejercicio. Esta métrica ha demostrado una fuerte correlación con umbrales metabólicos importantes, en particular el umbral ventilatorio 1 (VT1) y el umbral de lactato aeróbico (LT1). En un estudio realizado por Rogers et al. (2021), se ha observado que el punto en el cual el DFA-alpha1 cae por debajo de 0.75 coincide consistentemente con el VT1 en una amplia variedad de individuos, lo que sugiere que esta métrica puede utilizarse para estimar zonas de entrenamiento sin necesidad de pruebas invasivas o costosas.

Esta relación ha sido verificada tanto en poblaciones entrenadas como no entrenadas, lo que sugiere que el DFA-alpha1 no solo es sensible, sino también robusto frente a la variabilidad interindividual. La posibilidad de estimar zonas de entrenamiento personalizadas sin necesidad de lactato capilar o ergoespirometría representa un avance significativo en accesibilidad. Esta validación fisiológica ha permitido que herramientas como Fatmaxxer, Runalyze o sciencepeaks incorporen este marcador en sus algoritmos de estimación de carga y umbrales. Además, varios estudios han explorado la relación entre el DFA-alpha1 y otros indicadores como la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), el consumo de oxígeno (VO₂) y la eficiencia cardiorrespiratoria, lo cual permite establecer perfiles de esfuerzo más completos.



El uso longitudinal de la VFC también ha sido relacionado con una reducción en la incidencia de lesiones por sobrecarga. Esto se debe a que el seguimiento constante permite detectar fases de disfunción autonómica subclínica, donde el cuerpo aún no manifiesta síntomas, pero ya se encuentra bajo un alto nivel de estrés fisiológico. En estos casos, realizar ajustes preventivos en la carga puede evitar el paso a fases más críticas de fatiga o lesión. La literatura en medicina deportiva ha resaltado que atletas con mayor estabilidad en la VFC tienden a tener mejores perfiles de recuperación, menor riesgo de enfermedad durante fases intensas del entrenamiento y mayor consistencia en el rendimiento competitivo.

También se ha demostrado que el entrenamiento guiado por VFC, lejos de ser pasivo o conservador, puede producir resultados comparables a los de los programas tradicionales, e incluso superiores en términos de sostenibilidad a largo plazo. Al permitir días de alta intensidad cuando el sistema autonómico está preparado y facilitar sesiones más ligeras cuando hay signos de fatiga, este enfoque reduce el riesgo de *burnout* y mejora la adherencia a los programas. En disciplinas como el triatlón o el ciclismo, donde las cargas acumuladas pueden ser extremas, esta estrategia se ha vuelto especialmente valiosa para mantener la salud y la disponibilidad del atleta durante toda la temporada.

Sin embargo, no todo en este campo está libre de limitaciones. La validez de estas métricas depende en gran medida de la calidad de la señal, de la estandarización de las condiciones de medición y de la interpretación contextual. Por ejemplo, la VFC puede verse afectada por factores como el alcohol, el estrés emocional, la temperatura ambiente o incluso la posición corporal durante la medición. En el caso del DFA-alpha1, la precisión depende de contar con registros de alta calidad, obtenidos con bandas torácicas validadas (como la Movesense o la Polar H10), ya que el análisis de intervalos RR requiere una resolución milisegundo a milisegundo. La interpretación del alpha1 también exige tener en cuenta si el sujeto está realizando ejercicio constante, si hay variaciones en la cadencia o si existen artefactos por respiración irregular.

Otro aspecto importante es la necesidad de replicación y estandarización metodológica. Aunque hay estudios sólidos que respaldan estas métricas, la comunidad científica aún trabaja en mejorar los protocolos, validar algoritmos entre distintas plataformas y establecer criterios comunes de interpretación. Esto es especialmente relevante cuando se integran datos con modelos de inteligencia artificial, donde la transparencia del algoritmo y la trazabilidad de las decisiones son fundamentales para mantener la confianza del usuario y del profesional. Además, todavía existen preguntas abiertas en torno a cómo se comportan estas métricas en poblaciones clínicas, en mujeres (considerando las fases del ciclo menstrual) o en deportistas en edad adolescente o avanzada.

En la actualidad, se está promoviendo activamente el desarrollo de estudios comparativos entre distintos métodos de estimación de umbrales. Por ejemplo, comparar



el punto de caída del DFA-alpha1 con el VT1 obtenido mediante gasometría directa, o con modelos basados en la percepción subjetiva. Estos estudios están ayudando a refinar las herramientas disponibles y a establecer márgenes de error aceptables para su uso práctico. También se están desarrollando metaanálisis que consolidan la información publicada y permiten establecer criterios basados en evidencia de alto nivel.

A pesar de las limitaciones mencionadas, el consenso general es que tanto la VFC como el DFA-alpha1 representan avances significativos en la fisiología aplicada. Su capacidad para ofrecer información en tiempo real, no invasiva y altamente sensible a los cambios del estado interno los convierte en aliados esenciales para el entrenamiento moderno. Lejos de reemplazar otras formas de evaluación, estas métricas complementan y enriquecen la comprensión del estado del atleta, permitiendo una aproximación más individualizada y adaptativa.

El uso combinado de la VFC en reposo y del DFA-alpha1 durante el ejercicio ofrece un panorama aún más potente. La VFC permite monitorizar el estado basal del sistema nervioso, mientras que el alpha1 revela cómo se comporta durante la carga progresiva. Esta combinación permite distinguir entre una fatiga general (detectada por la VFC) y una pérdida de tolerancia al esfuerzo (reflejada por una caída temprana del DFA-alpha1). Esto no solo mejora la detección de estados de disfunción, sino que también puede ser útil en procesos de rehabilitación, planificación de picos de forma o retorno progresivo al entrenamiento tras una lesión o enfermedad.

En el ámbito clínico, también se están explorando aplicaciones de estas métricas. Por ejemplo, en pacientes con enfermedades cardiovasculares, la monitorización del alpha1 durante esfuerzos controlados podría ayudar a determinar la intensidad adecuada del ejercicio. En personas mayores, donde la reserva fisiológica es limitada, la VFC podría servir como indicador temprano de deterioro funcional. Asimismo, en el campo de la salud mental, existen investigaciones que vinculan la VFC con la regulación emocional, el estrés crónico y trastornos como la ansiedad generalizada o la depresión.

En resumen, la validación científica de la VFC y del DFA-alpha1 es extensa y continúa en expansión. Estas métricas han demostrado ser fiables, sensibles y clínicamente relevantes. Si bien todavía existen desafíos metodológicos y contextuales, el cuerpo de evidencia disponible justifica su integración en los programas de entrenamiento y en la práctica clínica. Su fortaleza radica no solo en su base fisiológica, sino en su capacidad para adaptarse a cada individuo y en su utilidad como parte de un enfoque más amplio y holístico del rendimiento y la salud.

Ejemplo de uso de la VFC nocturna

La figura 2 muestra la evolución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) nocturna medida con un Garmin Venu 3S, entre el 12 de junio y el 9 de julio. Los datos



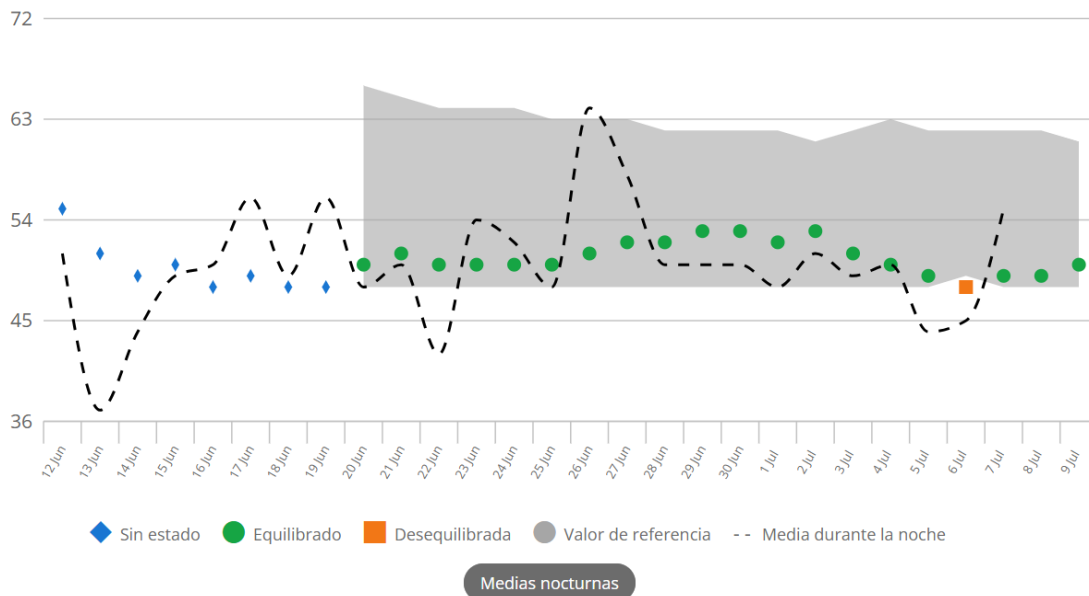
corresponden a medias nocturnas extraídas automáticamente durante el sueño (línea discontinua) y a la media diaria (puntos). En el eje vertical se representan los valores de VFC (RMSSD), mientras que en el eje horizontal se observa la progresión temporal diaria.

Los primeros registros, indicados con puntos azules, corresponden al periodo inicial utilizado por el sistema para establecer un valor de referencia individual. A partir del 21 de junio, se habilita la clasificación automática de cada noche en función del estado del sistema nervioso autónomo: los valores dentro del rango se marcan en verde (equilibrado), mientras que las desviaciones fuera del rango se marcan en naranja (desequilibrado). La línea discontinua negra representa la media nocturna diaria de VFC, y la banda gris delimita los márgenes de referencia personalizados.

Durante el periodo de referencia (del 12 al 20 de junio), la VFC muestra una primera caída abrupta (13 de junio), seguida de una recuperación progresiva y ciertas oscilaciones naturales. Esta fase basal permite definir los límites individualizados de lo que se considera una respuesta fisiológica esperada. A partir del 21 de junio, la mayoría de los valores se mantienen dentro del rango, lo que sugiere un adecuado equilibrio autonómico. No obstante, se observa un descenso marcado los días 5 y 6 de julio, siendo este último clasificado como desequilibrado. Este patrón puede reflejar una respuesta aguda al estrés fisiológico, atribuible a factores como una sesión de entrenamiento especialmente intensa, una acumulación de carga, alteraciones en el sueño, estrés psicosocial o incluso un inicio de enfermedad. La recuperación posterior sugiere, sin embargo, una buena capacidad adaptativa y de resiliencia del organismo.

Para una interpretación más precisa de estos cambios, es relevante destacar que entrenadores y personal técnico pueden acceder a variables adicionales asociadas al contexto del deportista, como el tipo de entrenamiento realizado, la carga externa e interna, el nivel de esfuerzo percibido o la distribución semanal de las sesiones. Esta información contextual permite correlacionar de forma más robusta los cambios en la VFC con estímulos específicos, mejorando la toma de decisiones sobre la planificación, la recuperación y la prevención de sobrecargas. En este sentido, el uso integrado de tecnologías portables como el Garmin Venu 3S facilita una monitorización longitudinal más precisa del estado de recuperación y del equilibrio autonómico del deportista, tanto en contextos de rendimiento como de salud.

Figura 2. Evolución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) nocturna registrada con un reloj Garmin Venu 3S durante el periodo del 12 de junio al 9 de julio



Fuente: elaboración propia

Ejemplo de uso de la VFC durante una competición ciclista

La figura 3 muestra la evolución de tres indicadores fisiológicos medidos con la banda de frecuencia cardíaca Movesense de sciencepeaks. Estos indicadores fueron registrados en un ciclista profesional durante un periodo que incluye la participación en la Volta a Catalunya de 2025, marcada por el área sombreada. El atleta en cuestión es un corredor activo, con un rol ofensivo en la carrera, participando en escapadas durante las primeras etapas, lo que implicó una elevada exigencia física.

El primer gráfico (izquierda) muestra la evolución del RMSSD, un parámetro sensible de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) asociado al tono parasimpático. Se observa una caída abrupta en este valor el día 27 de marzo, justo en el corazón de la competición, seguida de una recuperación progresiva en los días siguientes. Este descenso indica una supresión del tono vagal, compatible con un estado de fatiga aguda o estrés fisiológico importante, probablemente asociado a la carga competitiva elevada y al esfuerzo sostenido durante las escapadas.

El segundo gráfico (centro) representa la tendencia del índice LF/HF, una métrica que refleja el equilibrio entre las ramas simpática y parasimpática del sistema nervioso autónomo. Durante los días de competición, se produce una fuerte oscilación en este índice, con un pico elevado, seguido de una caída brusca (día 30), lo que sugiere alteraciones transitorias en el balance autonómico. Estas fluctuaciones pueden interpretarse como un signo de disfunción temporal del sistema de regulación del estrés,

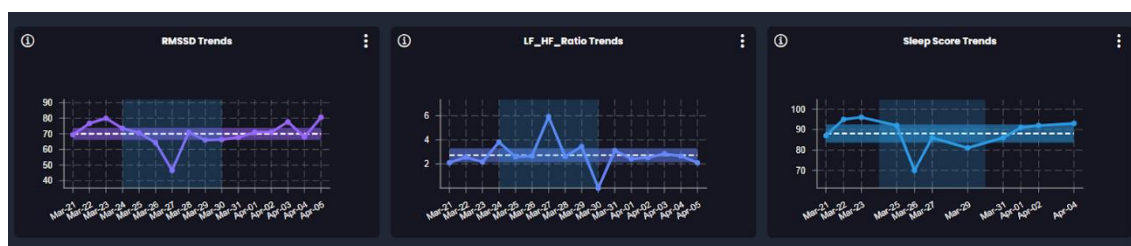


posiblemente provocada por la fatiga acumulada y la falta de una recuperación suficiente entre etapas.

Finalmente, el gráfico derecho muestra la evolución del *sleep score* o puntuación del sueño. Esta métrica también cae notablemente hacia el día 26, coincidiendo con los picos de esfuerzo y estrés fisiológico, y se recupera gradualmente tras finalizar la competición. Esta caída refleja una disminución en la calidad del sueño, algo común durante competiciones por etapas, donde factores como los desplazamientos, el estrés mental, el dolor muscular y las activaciones tardías pueden interferir con el descanso nocturno.

En conjunto, la figura ilustra con claridad cómo una competición exigente como la Volta a Catalunya puede afectar el equilibrio autonómico, la recuperación y el sueño de un ciclista profesional. La caída simultánea en RMSSD y en la calidad del sueño, junto con la inestabilidad del índice LF/HF, apuntan a un claro estado de carga aguda. Estas herramientas de monitorización ofrecen información valiosa al equipo técnico para ajustar la recuperación, individualizar estrategias poscompetición y prevenir el sobreentrenamiento o la fatiga crónica.

Figura 3. Evolución del RMSSD, índice LF/HF y puntuación de sueño durante la Volta a Catalunya (área sombreada) en un ciclista profesional. Datos recogidos mediante la plataforma sciencepeaks y el sensor de frecuencia cardíaca Movesense



Fuente: elaboración propia

Reflexión final del bloque

La medición de la VFC mediante dispositivos accesibles y validados ha transformado la forma de entender la respuesta del organismo al entrenamiento, al estrés y a la recuperación. Lejos de ser una métrica aislada, la VFC permite una planificación más individualizada, anticipando la fatiga y optimizando la carga. Su integración con plataformas, algoritmos y métricas prometedoras como el DFA-alpha1 posiciona a la VFC como un pilar clave en el entrenamiento basado en datos, combinando ciencia, tecnología e individualización deportiva.

Uso de *wearables* en la prevención de sobreentrenamiento

Monitorización de signos de fatiga y estrés

El sobreentrenamiento, especialmente en su forma no funcional (OTS, *overtraining syndrome*), es una de las condiciones más complejas y perjudiciales que puede afectar a un deportista. Su aparición está relacionada con una acumulación crónica de estrés fisiológico y psicológico que supera la capacidad de recuperación del organismo. Uno de los principales desafíos para entrenadores y profesionales del deporte es detectarlo de forma precoz y objetiva, antes de que se manifiesten síntomas clínicos o caídas en el rendimiento.

En este sentido, los *wearables* se han convertido en una herramienta valiosa para la monitorización continua de signos de fatiga. A través de variables como la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), la calidad del sueño, la frecuencia cardíaca en reposo, la temperatura cutánea y la respuesta glucémica, es posible construir un perfil fisiológico diario del deportista.

Entre los principales indicadores de alerta que pueden detectarse con dispositivos portátiles se encuentran los siguientes:

- Disminución persistente de la VFC basal (indicativo de predominio simpático).
- Elevación de la frecuencia cardíaca matutina (señal de estrés cardiovascular).
- Aumento de la variabilidad glucémica o hipoglucemias recurrentes sin causa aparente.
- Alteraciones del sueño: menor duración, más despertares o latencia prolongada.
- Cambios en la temperatura dérmica o sudoración nocturna.

Al analizar estos datos en conjunto, los profesionales pueden detectar **tendencias que preceden al sobreentrenamiento**, incluso en ausencia de síntomas subjetivos.

Identificación temprana de desequilibrios

Una de las ventajas clave de los *wearables* es su capacidad para detectar desequilibrios antes de que se manifiesten clínicamente. Gracias a la recopilación diaria de datos, es posible establecer un «perfil basal» o normativo para cada deportista, que actúa como referencia individual. Ante una desviación significativa respecto de ese patrón, el sistema puede activar alertas o recomendar modificaciones en el entrenamiento. Entre los desequilibrios más frecuentes, se encuentran los siguientes:

- Falta de recuperación completa entre sesiones (VFC baja, glucosa elevada, mal sueño).
- Respuesta anormal a cargas habituales (elevación desproporcionada de la frecuencia cardíaca o alteración del DFA-alpha1).

- Cambios súbitos en el ritmo circadiano o en la variabilidad diaria de las métricas.
- Deterioro de la eficiencia metabólica (aumento de la respuesta glucémica a comidas habituales).

Este tipo de información resulta clave para prevenir estados de fatiga crónica, disminuir el riesgo de lesión y optimizar la progresión del entrenamiento.

Ajustes en el volumen e intensidad del entrenamiento

La capacidad de tomar decisiones basadas en datos objetivos en tiempo real permite adaptar la planificación del entrenamiento con mayor precisión. Los *wearables* ofrecen información útil que permite, entre otras acciones, las siguientes:

- **Modificar la intensidad del día.** Por ejemplo, pasar una sesión intensa prevista a una sesión aeróbica regenerativa si los indicadores de fatiga lo sugieren.
- **Reprogramar descansos.** No solo en función del calendario, sino del estado real del organismo.
- **Establecer umbrales individualizados.** Por ejemplo, los estimados con el DFA-alpha1, que permiten personalizar zonas de entrenamiento sin pruebas invasivas.
- **Controlar la carga aguda-crónica** con registros automáticos de frecuencia cardíaca, potencia o velocidad.

De este modo, la programación se vuelve más flexible, individualizada y adaptativa, en contraposición al modelo tradicional de planificación rígida.

Personalización de programas de recuperación

La recuperación no es un proceso pasivo ni uniforme. Cada deportista responde de manera diferente a los mismos estímulos, y lo que es suficiente para uno puede resultar insuficiente o excesivo para otro. Los *wearables* permiten ajustar las estrategias de recuperación en función de variables como el tipo y cantidad de sueño nocturno, la evolución de la VFC tras una carga elevada, la glucosa en ayunas o posejercicio, y la actividad física incidental, que incluye pasos, movimiento y estrés térmico.

Con base en estos datos, se pueden recomendar intervenciones específicas adaptadas a las necesidades del deportista, como masajes, crioterapia, sauna o hidroterapia, técnicas de respiración y control del sistema parasimpático, ajustes nutricionales (como mayor consumo de carbohidratos o inclusión de suplementos específicos), o incluso el incremento del descanso y cambios en la distribución semanal de las cargas.

La personalización de la recuperación se posiciona así como uno de los factores clave para sostener el rendimiento a largo plazo.

Técnicas de relajación y descanso activo

El monitoreo en tiempo real de indicadores fisiológicos a través de dispositivos *wearables* ofrece una gran ventaja para la gestión personalizada del estrés y la fatiga en deportistas. Gracias a la disponibilidad inmediata de datos como la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), el pulso, los patrones respiratorios y otros biomarcadores, es posible implementar técnicas de relajación y descanso activo adaptadas al estado actual del atleta, optimizando así los procesos de recuperación.

La activación excesiva del sistema nervioso simpático, que se refleja en parámetros como una VFC baja, un pulso elevado y una respiración superficial o acelerada, es una señal clara de que el organismo está en un estado de estrés elevado. Esta situación puede ser perjudicial si se mantiene de forma prolongada, ya que impide una recuperación adecuada y puede conducir al sobreentrenamiento.

En este contexto, la intervención temprana mediante técnicas específicas de relajación puede revertir o atenuar estos efectos, ayudando a restaurar el equilibrio autonómico, mejorar la calidad del sueño y reducir la percepción subjetiva de fatiga. En la tabla 4 se presentan algunas de las técnicas más efectivas y recomendadas. Luego, explicamos con mayor detalle cada una.

Tabla 4. Técnicas de relajación y descanso activo adaptadas al estado fisiológico del deportista

Técnica	Indicaciones fisiológicas	Método de aplicación	Beneficios principales
Respiración diafragmática guiada	Baja VFC, pulso elevado, respiración superficial	<i>Apps</i> móviles con guías visuales y auditivas	Activación parasimpática, reducción frecuencia cardíaca, disminución ansiedad
<i>Mindfulness</i> / meditación breve	Activación simpática alta, estrés psicológico	Sesiones de 5-15 minutos con guía o <i>apps</i>	Reducción estrés, mejora control emocional, recuperación mental

Caminar en zonas verdes	Estrés general, alta carga cognitiva	Paseos suaves en entornos naturales	Restauración psicológica, reducción activación simpática, mejora ánimo
Ejercicio aeróbico regenerativo (zona 1)	Fatiga muscular, recuperación física insuficiente	Ejercicio suave con control de FC (50-60 % máximo)	Mejora circulación, eliminación metabolitos, recuperación muscular

Fuente: elaboración propia

- **Ejercicios de respiración diafragmática guiados por *apps* móviles**

La respiración diafragmática, también conocida como respiración abdominal, es una técnica de relajación que consiste en activar de forma consciente el músculo diafragma para lograr una respiración profunda, lenta y controlada. Esta práctica promueve la activación del sistema nervioso parasimpático, responsable de los procesos de relajación y recuperación.

Actualmente, existen múltiples aplicaciones móviles que guían al usuario mediante instrucciones visuales y auditivas para realizar ejercicios de respiración estructurados, lo que facilita su práctica en cualquier lugar y momento. La implementación de esta técnica puede reducir la frecuencia cardíaca, mejorar la oxigenación y disminuir la ansiedad en pocos minutos.

- **Sesiones breves de *mindfulness* o meditación supervisada**

El *mindfulness*, o atención plena, consiste en prestar atención al momento presente de forma intencionada y sin juzgar. Diversos estudios han demostrado que la práctica regular de *mindfulness* o meditación puede reducir el estrés psicológico y fisiológico, mejorar el control emocional y potenciar la recuperación tras el entrenamiento.

Las sesiones breves, de entre 5 y 15 minutos, guiadas por un instructor o mediante *apps* especializadas, pueden implementarse de forma inmediata al detectar signos de activación simpática elevada, ayudando a modular el sistema nervioso y a mejorar la capacidad de afrontamiento del deportista.

- **Caminar en zonas verdes con baja carga cognitiva**

El contacto con entornos naturales tiene efectos restauradores tanto a nivel psicológico como fisiológico. Caminar en parques o espacios verdes reduce la tensión mental, mejora el estado de ánimo y disminuye la activación del sistema nervioso simpático.



Este tipo de descanso activo, que combina movimiento suave con estímulos visuales y sensoriales relajantes, permite desconectar de las demandas cognitivas y físicas intensas del entrenamiento, favoreciendo un estado de relajación profunda.

- **Ejercicio aeróbico regenerativo en zona 1 con control de frecuencia cardíaca**

El descanso activo también puede incluir actividades físicas de baja intensidad, conocidas como ejercicios regenerativos. Realizar ejercicio aeróbico suave, en la llamada «zona 1» de frecuencia cardíaca (aproximadamente el 50–60 % del máximo), estimula la circulación sanguínea, facilita la eliminación de metabolitos de fatiga y mejora la recuperación muscular sin añadir estrés al organismo.

El uso de monitores cardíacos permite mantener esta actividad dentro de un rango óptimo, evitando sobrecargas adicionales y optimizando los beneficios regenerativos.

Una de las ventajas más innovadoras de combinar estas técnicas con el uso de *wearables* es la posibilidad de crear un *biofeedback* consciente. El deportista no solo recibe datos objetivos sobre su estado fisiológico, sino que puede actuar en consecuencia en tiempo real, aplicando la técnica adecuada para reducir su estrés y potenciar la recuperación.

Este ciclo de monitoreo–intervención–ajuste genera una sinergia que favorece la autorregulación y la autonomía del atleta, transformando la recuperación en un proceso activo, dinámico y personalizado. En consecuencia, el riesgo de caer en estados de sobreentrenamiento disminuye y se promueve un mejor rendimiento a largo plazo.

Seguimiento de la eficacia de intervenciones

Una de las ventajas más significativas que aporta la tecnología *wearable* en el ámbito deportivo es la posibilidad de evaluar de manera objetiva y en tiempo real la eficacia de las intervenciones diseñadas para mejorar el rendimiento y la recuperación del deportista. Tradicionalmente, los ajustes en los planes de entrenamiento o en las estrategias de recuperación se realizaban basándose en la percepción subjetiva del atleta, la experiencia del entrenador o, en el mejor de los casos, a partir de mediciones ocasionales realizadas en laboratorio o en clínica deportiva. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones importantes, especialmente por la demora en obtener resultados visibles o cuantificables, que pueden tardar días, semanas o incluso meses.

Los dispositivos *wearables*, al proporcionar datos continuos y específicos sobre diversas variables fisiológicas, permiten a los profesionales del deporte, así como a los propios atletas, realizar un seguimiento detallado y dinámico de cómo responde el organismo ante diferentes estímulos, intervenciones o cambios en la rutina. Esto se traduce en una capacidad sin precedentes para realizar evaluaciones precisas y fundamentadas en la evidencia propia del cuerpo de cada individuo, lo cual es clave para personalizar y optimizar las estrategias de entrenamiento y recuperación.



Para ilustrar esta ventaja, resulta útil considerar algunos ejemplos prácticos que muestran cómo las intervenciones pueden evaluarse a partir de sus efectos, medidos directamente por los *wearables*. A continuación, se presentan algunas situaciones representativas:

- **Impacto de una noche con baño caliente y dieta rica en triptófano sobre el sueño y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC)**

Una estrategia comúnmente utilizada para mejorar la calidad del sueño, y con ello la recuperación, es la combinación de un baño caliente previo a acostarse junto con la ingesta de alimentos ricos en triptófano, un aminoácido precursor de la serotonina y la melatonina, neurotransmisores vinculados con la regulación del sueño. Mediante el monitoreo con dispositivos *wearables*, es posible evaluar si esta combinación conduce efectivamente a una mejora en parámetros como la duración del sueño profundo, la reducción de interrupciones durante la noche y, en particular, un aumento en la VFC basal al día siguiente, lo cual indicaría un mayor predominio parasimpático y una mejor recuperación autonómica.

Este tipo de evaluación es mucho más precisa que basarse únicamente en la percepción subjetiva del descanso, ya que brinda información objetiva y cuantificable, permitiendo confirmar si estas recomendaciones tienen un impacto tangible o si es necesario ajustar el enfoque.

- **Efectos de eliminar una sesión de alta intensidad sobre el índice DFA-alpha1**

El índice DFA-alpha1 es una métrica derivada del análisis de la dinámica de la variabilidad de la frecuencia cardíaca, que ha demostrado ser un marcador sensible para detectar fatiga central y sobreentrenamiento. Si un atleta presenta signos de fatiga acumulada o estrés excesivo, eliminar una sesión de entrenamiento de alta intensidad puede ser una estrategia eficaz para favorecer la recuperación. Los *wearables* permiten verificar si esta intervención produce un cambio favorable en el DFA-alpha1, lo cual indicaría una reducción del estrés fisiológico y una mejora en la capacidad de recuperación.

Este seguimiento detallado facilita la toma de decisiones fundamentadas, evitando prolongar situaciones que podrían deteriorar el rendimiento o la salud del deportista y, al mismo tiempo, previniendo una pérdida innecesaria de condición física por un sobre-reposo inadecuado.

- **Influencia de una semana con mayor disponibilidad de carbohidratos en la reducción de episodios de hipoglucemia**

En deportes de resistencia o entrenamientos prolongados, mantener niveles adecuados de glucosa en sangre es crucial para sostener el rendimiento y evitar la fatiga prematura.



Los sensores continuos de glucosa integrados en algunos *wearables* permiten detectar episodios recurrentes de hipoglucemia o fluctuaciones significativas en la glucemia.

Si se aumenta la disponibilidad de carbohidratos mediante la dieta durante una semana, es posible analizar, a través de estos dispositivos, si se produce una reducción en la frecuencia o intensidad de estos episodios. Esto indicaría una mejora en el equilibrio energético y una mayor estabilidad metabólica. De este modo, se puede adaptar la nutrición de forma individualizada y basada en datos objetivos, mejorando el soporte energético para el entrenamiento y la competición.

Ventajas de la retroalimentación inmediata y contextualizada

El valor fundamental de este enfoque reside en que la retroalimentación no solo es mucho más inmediata que los métodos tradicionales, sino que también está contextualizada en el día a día y en las condiciones reales del deportista. Ya no es necesario esperar a evaluar cambios en el rendimiento competitivo, que pueden tardar en manifestarse y estar sujetos a múltiples variables externas, como la estrategia de carrera, las condiciones climáticas o la presión psicológica.

Con la información obtenida a través de *wearables*, las decisiones pueden tomarse con rapidez, ajustando la carga de entrenamiento, modificando la nutrición o aplicando técnicas de recuperación en función de cómo responde el cuerpo, lo que reduce la incertidumbre y minimiza los riesgos. Esto también incrementa la motivación y la adherencia del atleta, quien siente un mayor control sobre su proceso de mejora y puede visualizar en tiempo real los beneficios de sus acciones.

Además, esta práctica favorece una cultura de autoconocimiento y autorregulación, donde el deportista aprende a interpretar sus propios datos, identifica patrones y señales tempranas de fatiga o estrés, y participa activamente en su recuperación y optimización del rendimiento.

Ejemplos y casos de estudio en la interpretación de datos de *wearables* para la evaluación de intervenciones

A continuación, se presentan algunos ejemplos de cómo utilizar las métricas obtenidas con dispositivos portables para evaluar si una intervención ha sido efectiva. La tabla 5 muestra distintos parámetros clave medidos por estos dispositivos, su significado fisiológico y la forma en que pueden interpretarse para optimizar el entrenamiento y la recuperación deportiva.

Caso 1: mejora del sueño y VFC tras un baño caliente y comida rica en triptófano

- **Contexto.** Un corredor de fondo con reportes subjetivos de sueño interrumpido decide implementar una intervención: tomar un baño caliente una hora antes de



dormir y consumir alimentos ricos en triptófano (como pavo, plátano o nueces) en la cena durante siete días consecutivos.

- **Datos a monitorear.** Duración y calidad del sueño (fases de sueño profundo y REM); variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) basal al despertar; frecuencia cardíaca en reposo.
- **Interpretación.** Si los datos del *wearable* muestran un aumento en la duración del sueño profundo, reducción en los despertares nocturnos y un incremento significativo en la VFC basal, puede concluirse que la intervención tuvo un efecto positivo sobre la recuperación autonómica y la calidad del sueño. En caso de no observarse mejoras, o si los valores empeoran, se deberían considerar otros factores contextuales, como el estrés, las condiciones ambientales o la higiene del sueño.

Caso 2: evaluación del efecto de eliminar sesiones de alta intensidad con el índice DFA-alpha1

- **Contexto.** Una ciclista experimenta signos de fatiga crónica y muestra una reducción progresiva en su rendimiento. Para evitar un cuadro de sobreentrenamiento, decide eliminar una sesión de entrenamiento de alta intensidad durante una semana.
- **Datos a monitorear.** DFA-alpha1, que indica la complejidad del ritmo cardíaco y se asocia con el nivel de fatiga; frecuencia cardíaca en reposo; percepción subjetiva de fatiga (cuestionarios).
- **Interpretación.** Un aumento del DFA-alpha1 hacia valores normales tras eliminar la sesión indica una mejora en la regulación autonómica y en la recuperación del sistema nervioso central. Si, además, la frecuencia cardíaca en reposo disminuye y la percepción subjetiva de fatiga mejora, puede considerarse que la intervención fue exitosa. En caso contrario, podría ser necesario extender el periodo de recuperación o aplicar otras estrategias complementarias.

Caso 3: control de episodios de hipoglucemia con mayor disponibilidad de carbohidratos

- **Contexto.** Un triatleta presenta episodios recurrentes de hipoglucemia durante entrenamientos largos, detectados mediante un sensor continuo de glucosa. Se ajusta la ingesta de carbohidratos, aumentando su cantidad y frecuencia durante una semana.



- **Datos a monitorear.** Frecuencia y duración de episodios de glucosa baja (menos de 70 mg/dL); variabilidad glucémica general; rendimiento y sensación de energía durante el entrenamiento.
- **Interpretación.** Una reducción significativa en los episodios de hipoglucemia y una mayor estabilidad en los niveles glucémicos indican que la estrategia nutricional es efectiva. Si los episodios persisten, se deben considerar ajustes adicionales, como incrementar aún más la ingesta o modificar el tipo de carbohidratos utilizados.

Tabla 5. Parámetros clave obtenidos por dispositivos portables y cómo interpretarlos para ver si una intervención ha sido efectiva

Parámetro	Qué mide	Valores indicativos	Interpretación básica
Variabilidad frecuencia cardíaca (VFC)	Variación en el tiempo entre latidos cardíacos	Alta VFC: buen balance parasimpático. Baja VFC: estrés o fatiga	Una VFC baja sostenida puede indicar sobrecarga o falta de recuperación. Un aumento sugiere recuperación y equilibrio.
Frecuencia cardíaca en reposo (FCR)	Latidos por minuto en reposo	Valor normal según edad y condición física. Aumento indica estrés o fatiga	Aumento persistente puede ser signo de sobreentrenamiento o estrés. Disminución puede reflejar buena forma física.
DFA-alpha1	Complejidad y fractalidad de la señal cardíaca	Valores más altos reflejan buen estado autonómico. Valores bajos indican fatiga.	Cambios bruscos hacia valores bajos sugieren fatiga acumulada y riesgo de sobreentrenamiento.

Calidad del Sueño	Duración y fases del sueño	Duración óptima 7-9 horas, buen porcentaje de sueño profundo y REM.	Alteraciones frecuentes pueden impactar negativamente la recuperación.
Glucosa Continua	Niveles de glucosa en sangre	Valores normales entre 70-140 mg/dL durante actividad.	Hipoglucemias frecuentes (<70 mg/dL) indican desequilibrio energético.

Fuente: elaboración propia

Educación del atleta y el entrenador

La prevención del sobreentrenamiento no depende exclusivamente de la tecnología *wearable* ni de la acumulación de datos fisiológicos, sino que está profundamente ligada al nivel de conciencia, comprensión y compromiso tanto del atleta como del equipo técnico que lo acompaña. La tecnología, por avanzada que sea, no sustituye el conocimiento ni la capacidad de interpretación contextualizada de quienes participan en el proceso de entrenamiento y recuperación.

Para maximizar el potencial de los dispositivos *wearables*, es fundamental implementar procesos educativos que permitan a atletas y entrenadores comprender en profundidad qué representan los datos que reciben y cómo utilizarlos para tomar decisiones acertadas. Este conocimiento facilita la detección temprana de signos de fatiga o estrés y promueve una gestión proactiva del entrenamiento y la recuperación.

Entre los aspectos educativos se incluyen los siguientes:

1. **Significado e interpretación de los parámetros fisiológicos.** Es necesario que tanto atletas como entrenadores comprendan qué mide cada variable registrada por los *wearables*, como la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), la frecuencia cardíaca en reposo, la calidad del sueño, la temperatura corporal o los niveles glucémicos. Conocer qué implica un cambio en estos indicadores permite diferenciar entre fluctuaciones normales y señales preocupantes que requieren intervención.
2. **Identificación de variaciones significativas.** No todas las variaciones en los datos son relevantes desde el punto de vista clínico o del rendimiento. Por ello, es crucial aprender a identificar cuándo una variación en un parámetro es estadística y fisiológicamente significativa, y cuándo puede considerarse dentro de la

variabilidad esperada. Esta habilidad evita alarmas innecesarias y fomenta una respuesta adecuada y oportuna.

3. **Relación entre datos fisiológicos, descanso, carga de entrenamiento y rendimiento.** Los datos fisiológicos no deben interpretarse de forma aislada, sino en el contexto del plan de entrenamiento, la calidad del descanso y el rendimiento deportivo. Educar sobre cómo se interrelacionan estos factores ayuda a construir una visión integral que facilite ajustar la carga de trabajo, optimizar los periodos de recuperación y prevenir el riesgo de sobreentrenamiento.
4. **Fomento de hábitos de autorregistro, reflexión y comunicación.** Más allá del conocimiento técnico, es esencial que atletas y entrenadores desarrollen hábitos constantes de autorregistro y reflexión sobre los datos obtenidos. Esto implica dedicar tiempo a revisar y analizar las tendencias en los parámetros fisiológicos, reflexionar sobre posibles causas y efectos, y comunicar de manera efectiva las observaciones dentro del equipo técnico. Una comunicación fluida y basada en datos concretos fortalece la toma de decisiones y la confianza mutua.

Estos procesos educativos no solo empoderan a los deportistas y entrenadores, sino que también facilitan la integración efectiva de la tecnología en la práctica diaria del entrenamiento, transformándola en una herramienta útil y no en un simple acumulador de información que pueda generar confusión o ansiedad. A modo de resumen, la siguiente tabla organiza los principales contenidos educativos necesarios para que atletas y entrenadores interpreten adecuadamente los datos obtenidos mediante *wearables*.

Tabla 6. Elementos clave en la educación para la gestión del sobreentrenamiento mediante dispositivos portables

Elemento educativo	Contenido principal	Objetivo	Beneficios
Interpretación de parámetros fisiológicos	Qué mide cada variable y su significado	Comprender el lenguaje de los datos	Decisiones informadas basadas en evidencia objetiva
Detección de variaciones significativas	Cuándo un cambio es relevante o normal	Evitar falsas alarmas y respuestas adecuadas	Respuestas precisas y oportunas



Relación entre datos y entrenamiento	Cómo vincular datos fisiológicos con descanso y carga	Integrar datos en el contexto global del deportista	Optimización del rendimiento y prevención del daño
Hábitos de autorregistro y comunicación	Registro diario, análisis reflexivo y diálogo técnico	Crear una cultura de autoevaluación y colaboración	Mejor coordinación y mejora continua

Fuente: elaboración propia

Interpretación correcta de los datos: la clave para evitar errores y maximizar beneficios

El avance exponencial de la tecnología *wearable* ha facilitado la recopilación masiva de datos fisiológicos y de rendimiento en tiempo real, lo que ha revolucionado el abordaje del entrenamiento deportivo. Sin embargo, uno de los riesgos más relevantes asociados con el uso indiscriminado de esta tecnología es la interpretación errónea de los datos, que puede llevar a decisiones precipitadas o incluso contraproducentes para el atleta.

Para evitar estos errores, es esencial adoptar un enfoque sistemático y contextualizado en la interpretación de los datos. Una primera recomendación es enfocarse en las tendencias a largo plazo, más que en valores aislados o puntuales. Por ejemplo, una disminución súbita en la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) durante un solo día puede no ser alarmante, pero una caída sostenida a lo largo de varios días o semanas sí puede indicar un estado de fatiga acumulada o estrés crónico. La observación de patrones y tendencias permite identificar señales de advertencia tempranas y reducir la posibilidad de alarmas innecesarias.

Además, es imprescindible comparar los datos contra la línea base individual de cada deportista, y no frente a estándares genéricos o poblacionales. Cada persona presenta características fisiológicas propias y respuestas únicas al entrenamiento. Por ejemplo, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) basal o la frecuencia cardíaca en reposo pueden diferir notablemente entre atletas, incluso dentro de una misma disciplina. Por ello, establecer un perfil individualizado resulta fundamental para identificar desviaciones verdaderamente significativas en cada caso.

El contexto es otro factor crítico que no puede ser ignorado. Variables externas como los viajes con cambio de huso horario, las fases del ciclo menstrual, el estrés laboral o académico, la presencia de infecciones leves o las alteraciones ambientales influyen en los parámetros fisiológicos y de rendimiento. Integrar estos factores en el análisis de

datos evita interpretaciones erróneas y permite diseñar intervenciones más precisas y personalizadas.

La interpretación correcta también requiere combinar los datos objetivos registrados por los dispositivos con las percepciones subjetivas del atleta, tales como la escala de esfuerzo percibido (RPE), el bienestar general, el nivel de motivación y otros indicadores psicológicos. Esta integración de información cuantitativa y cualitativa proporciona un panorama más completo del estado del deportista, permitiendo detectar desajustes que podrían pasar desapercibidos si se analiza solo una dimensión.

Finalmente, es la experiencia y el criterio profesional del equipo técnico lo que transforma a los *wearables* de simples recolectores de información en herramientas verdaderamente efectivas para la gestión del entrenamiento y la recuperación. Capacitar a entrenadores y atletas en esta interpretación integral es una inversión clave para aprovechar al máximo el potencial de la tecnología, evitar errores de diagnóstico y tomar decisiones más acertadas, individualizadas y sostenibles.

Toma de decisiones informadas: cómo la monitorización continua potencia el rendimiento y previene lesiones

El propósito último de monitorizar de forma continua las variables fisiológicas y de entrenamiento no es la acumulación de datos sin fin, sino utilizar esa información para tomar decisiones mejor fundamentadas que favorezcan la salud y el rendimiento del atleta. Con la selección adecuada de dispositivos *wearables* y una interpretación correcta de los datos, es posible implementar un modelo de gestión del entrenamiento mucho más efectivo y personalizado.

Entre los beneficios concretos de esta toma de decisiones informadas destacan los siguientes:

1. **Detección anticipada de la necesidad de fases regenerativas.** Gracias al monitoreo continuo de indicadores como la VFC, la frecuencia cardíaca en reposo o la calidad del sueño, se puede identificar el momento en que el deportista empieza a mostrar signos de fatiga acumulada o exceso de estrés. Esto permite introducir una recuperación adecuada antes de que aparezcan lesiones por sobrecarga, caídas sostenidas en el rendimiento o *burnout*, optimizando el proceso de recuperación y la salud a mediano plazo.
2. **Validación objetiva de adaptaciones fisiológicas y rendimiento.** Los datos registrados durante microciclos o bloques de entrenamiento sirven para confirmar si las cargas aplicadas generaron las adaptaciones esperadas. Por ejemplo, mejoras en capacidad aeróbica o reducciones en el estrés autonómico serán evidentes en las métricas obtenidas, validando el diseño del plan o indicando



ajustes

necesarios.

3. **Afinación precisa de la carga de entrenamiento.** Con información actualizada y exacta, se pueden ajustar la intensidad, el volumen y la frecuencia de los entrenamientos para maximizar la supercompensación. De este modo, se logra el equilibrio óptimo entre estímulo y recuperación, evitando tanto la fatiga excesiva como la subestimulación, esenciales para progresar en el rendimiento.
4. **Planificación más acertada del pico de forma.** El conocimiento detallado del estado fisiológico individual permite planificar con mayor precisión cuándo alcanzar el nivel máximo de forma física para competencias específicas. Esto mejora la periodización y reduce la incertidumbre en la preparación, asegurando que el atleta llegue en óptimas condiciones al momento clave.

Este enfoque está alineado con los principios fundamentales de la fisiología aplicada moderna, que promueve la personalización, la objetividad, la prevención y la sostenibilidad del rendimiento deportivo. Incorporar estos pilares en la práctica diaria mediante el uso adecuado de *wearables* y una correcta interpretación de los datos contribuye a prolongar la carrera deportiva de forma saludable y eficiente.

La siguiente tabla resume una serie de buenas prácticas para optimizar la interpretación de los datos registrados por dispositivos portables y para tomar decisiones informadas en contextos de entrenamiento y recuperación:

Tabla 7. Buenas prácticas para la interpretación correcta de datos provenientes de *wearables* y la toma de decisiones informadas en el ámbito deportivo

Aspecto	Descripción	Objetivo	Beneficios
Observación de tendencias	Analizar datos en series temporales, no valores aislados	Detectar patrones de fatiga o mejora	Evita decisiones basadas en fluctuaciones momentáneas
Línea base individual	Comparar con perfiles propios del deportista	Personalizar la interpretación	Mayor precisión y relevancia clínica
Consideración del contexto	Integrar factores externos como estrés,	Entender influencias	Mejora la validez de las interpretaciones



	menstruación o viajes	externas en los datos	
Integración de datos objetivos y subjetivos	Combinar métricas fisiológicas con sensaciones del atleta	Obtener una visión holística del estado físico y mental	Facilita decisiones más equilibradas
Toma de decisiones proactiva	Usar datos para anticipar y ajustar entrenamientos y recuperación	Optimizar rendimiento y prevenir lesiones	Mejora continua y sostenibilidad deportiva

Fuente: elaboración propia

Estudios y evidencias sobre la efectividad del uso de *wearables* en la prevención del sobreentrenamiento

En los últimos años, una creciente cantidad de investigaciones científicas ha validado el uso de tecnologías *wearables* como herramientas eficaces para la monitorización fisiológica y la prevención del sobreentrenamiento en deportistas de diversas disciplinas. Estos dispositivos permiten obtener datos precisos y continuos sobre el estado autonómico, la calidad del sueño, la respuesta metabólica y otros indicadores clave que, combinados, ofrecen una visión integral del equilibrio entre carga y recuperación. A continuación, se presentan algunos de los hallazgos más relevantes.

- **Entrenar en función del estado autonómico mediante la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC):** varios estudios han demostrado que adaptar la intensidad y el volumen del entrenamiento con base en la VFC diaria no solo mejora la adherencia al programa, sino que también optimiza el progreso individual, reduciendo el riesgo de fatiga crónica y lesiones relacionadas.
- **Utilidad del índice DFA-alpha1 para anticipar pérdidas de rendimiento:** investigaciones recientes indican que los cambios en el DFA-alpha1, un marcador de la complejidad y dinámica de la señal cardíaca, pueden predecir caídas en el rendimiento antes de que sean evidentes en el resultado deportivo, permitiendo así una intervención preventiva temprana.
- **Impacto positivo de la retroalimentación diaria mediante *wearables*:** la disponibilidad de datos en tiempo real y la capacidad de recibir *feedback*

inmediato promueven un mayor compromiso del atleta con las prácticas de recuperación, mejorando la calidad del sueño, la hidratación y la nutrición, aspectos esenciales para evitar el sobreentrenamiento.

Resultados en diferentes disciplinas deportivas: adaptabilidad y versatilidad de los *wearables*

Aunque los estudios iniciales y la aplicación pionera de dispositivos *wearables* se concentraron principalmente en deportes de resistencia como el atletismo y el ciclismo, la tecnología ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta transversal aplicable a una amplia gama de disciplinas deportivas.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de su uso:

- **Deportes de equipo** (fútbol, baloncesto, rugby). Los *wearables* se utilizan para controlar los niveles de fatiga entre partidos y microciclos, lo que permite ajustar las cargas de entrenamiento, prevenir lesiones y optimizar la rotación de jugadores.
- **Deportes de combate:** en disciplinas como el boxeo, judo o MMA, la monitorización continua ayuda a seguir la recuperación tras entrenamientos intensos y a controlar los efectos del corte de peso, evitando riesgos metabólicos y hormonales asociados.
- **Atletismo:** se emplean para detectar signos precoces de sobrecarga durante fases de entrenamiento de alta intensidad, facilitando ajustes oportunos y evitando lesiones por sobreuso.
- **Crossfit y entrenamiento funcional:** la programación diaria puede ajustarse en función del estado de recuperación registrado por los *wearables*, lo que promueve una mejor periodización y evita la acumulación excesiva de fatiga.

Este panorama demuestra que la tecnología *wearable* no es exclusiva del alto rendimiento competitivo. Su aplicación se extiende a todos los niveles deportivos, incluidos los programas recreativos, de salud, rehabilitación y readaptación funcional, consolidándose como una herramienta útil para el cuidado integral del deportista.

Recomendaciones para la implementación efectiva de *wearables* en la prevención del sobreentrenamiento

Para garantizar que el uso de dispositivos *wearables* realmente aporte valor y contribuya a la prevención del sobreentrenamiento, es necesario seguir una serie de buenas

prácticas en su selección, manejo e integración dentro del proceso de entrenamiento. A continuación, se detallan algunas recomendaciones:

- **Elegir dispositivos validados científicamente.** No todos los *wearables* disponibles en el mercado ofrecen la misma precisión o fiabilidad. Es fundamental optar por aquellos que cuenten con respaldo de estudios independientes y que hayan demostrado validez y consistencia en la medición de las variables de interés.
- **Definir claramente qué variables se monitorizarán y cómo se interpretarán.** Antes de iniciar la monitorización, es importante establecer qué parámetros serán prioritarios según los objetivos deportivos y el perfil del atleta (por ejemplo, VFC, frecuencia cardíaca en reposo, calidad del sueño, glucemia, etc.) y definir protocolos claros para su análisis y acción.
- **Establecer rutinas diarias de registro y formación al deportista.** La consistencia en el uso y el registro es clave para obtener datos útiles y comparables. Además, capacitar a los atletas en el manejo de los dispositivos y en la comprensión básica de los datos fortalece la adherencia y la autoeficacia.
- **Integrar los datos en el proceso de toma de decisiones, no solo analizarlos *a posteriori*.** La monitorización debe ser una herramienta dinámica que influya en las decisiones diarias o semanales sobre cargas de entrenamiento, descanso y nutrición, evitando la acumulación de datos sin acción.
- **Promover una cultura de cuidado, autorregulación y recuperación proactiva.** Más allá de la tecnología, es esencial fomentar en atletas y entrenadores una mentalidad preventiva, basada en el respeto por los límites fisiológicos y la búsqueda activa del equilibrio entre esfuerzo y recuperación.

Implementar estos aspectos con rigor y dedicación garantiza que los *wearables* no sean solo *gadgets* tecnológicos, sino aliados estratégicos en el desarrollo sostenible del rendimiento deportivo.

Reflexión final del bloque

La tecnología *wearable* permite anticiparse al sobreentrenamiento mediante la monitorización continua de variables como la VFC, el sueño, la glucosa o la frecuencia cardíaca. Esta información, contextualizada y bien interpretada, facilita la toma de decisiones personalizadas, el ajuste de las cargas de entrenamiento y la promoción de estrategias de recuperación eficaces.

Referencias



Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J. M., Guillen-Garcia, S., Pérez-Berbel, P., Miralles-Vicedo, B., Roche, E., Vicente-Salar, N., & Moya-Ramón, M. (2022). *Heart rate variability-guided training for improving mortality predictors in patients with coronary artery disease. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10463. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710463>

Rogers, B., Gronwald, T., & Spendiff, O. (2021). A new detection method defining the aerobic threshold for endurance exercise and training prescription based on fractal correlation properties of heart rate variability. *Frontiers in Physiology*, 11, 596567. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.596567>

Referencias bibliográficas de referencia

Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46(10), 1461–1486. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0484-2>

Bellenger, C. R., Karavirta, L., Thomson, R. L., Buckley, J. D., & Fuller, J. T. (2016). Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with subjective and training load measures. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(6), 685–692. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26640275/>

Bourdillon, N., Yazdani, S., Schmitt, L., & Millet, G. P. (2021). DFA alpha1: An index of cardiac autonomic regulation and anaerobic threshold in athletes. *European Journal of Sport Science*, 21(5), 651–658. <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1221957/pdf>

Bruce, L., Bruce, S., & McConnell, T. (2022). Validity of the Polar H10 for HRV and DFA-alpha1 analysis during exercise. *Sensors*, 22(6), 2332. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36081005/>

Esco, M. R., Flatt, A. A., & Nakamura, F. Y. (2016). Agreement between HRV measures from wrist-worn device and chest strap during exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(10), 2916–2920.

Gronwald, T., Hoos, O., & Hottenrott, K. (2019). Effects of acute resistance exercise and endurance exercise on heart rate variability and DFA-alpha1. *Frontiers in Physiology*, 10, 915. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31498541/>



- Hautala, A. J., Tulppo, M. P., Mäkikallio, T. H., Laukkanen, R. T., & Huikuri, H. V.** (2001). Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clinical Physiology*, 21(2), 238–245. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11318832/>
- Hernando, D., Roca, S., Sancho, J., Alesanco, Á., & Bailón, R.** (2018). Validation of the Apple Watch for heart rate variability measurements during relax and mental stress in healthy subjects. *Sensors*, 18(8), 2619. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30103376/>
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., & Tulppo, M. P.** (2007). Endurance training guided individually by daily HRV in healthy middle-aged men. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 743–751. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17849143/>
- Penzel, T., Kantelhardt, J. W., Grote, L., Peter, J. H., & Bunde, A.** (2003). Comparison of detrended fluctuation analysis and spectral analysis for heart rate variability. *Computers in Cardiology*, 30, 307–310. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14560767/>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., & Buchheit, M.** (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: Opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773–781. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23852425/>
- Rogers, B., & Gronwald, T.** (2021). Fractal correlation properties of HRV as a biomarker of training status and fatigue. *Frontiers in Physiology*, 12, 598567. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34291602/>
- Rogers, B., & Gronwald, T.** (2022). Practical application of DFA-alpha1 to determine exercise thresholds: Implications for training prescription and fatigue monitoring. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 868036. <https://www.frontiersin.org/journals/sports-and-active-living/articles/10.3389/fspor.2021.668812/full>
- Schaffarczyk, M., Rogers, B., & Gronwald, T.** (2022). Determining the aerobic and anaerobic thresholds from heart rate variability: Practical implementation of DFA-alpha1 in endurance training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3365. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9894976/>
- Tarvainen, M. P., Niskanen, J. P., Lipponen, J. A., Ranta-aho, P. O., & Karjalainen, P. A.** (2014). Kubios HRV – Heart rate variability analysis software. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(1), 210–220. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24054542/>

