

Módulo 2. *Wearables* para medir lactato, deshidratación y pérdida de sodio

Tecnologías para medición de lactato

Tecnologías emergentes para la medición de lactato en sudor

Tradicionalmente, la medición de lactato ha sido una herramienta importante para la evaluación fisiológica del deportista, ya que permite estimar los umbrales metabólicos y controlar la carga interna. Sin embargo, su uso estaba restringido a contextos de laboratorio o entornos clínicos debido a su carácter invasivo —recolección de sangre capilar—, a la necesidad de equipamiento específico y a la intervención de personal altamente cualificado.

En los últimos años, el desarrollo de tecnologías *wearables* ha abierto la puerta a la medición no invasiva del lactato, especialmente mediante el análisis del sudor. Esta vía permite realizar una estimación continua del lactato sin interrumpir el ejercicio ni extraer sangre, lo que representa una innovación significativa en la monitorización del metabolismo anaeróbico.

Los sensores de sudor capaces de detectar lactato se basan en dos tecnologías principales. A continuación, se presentan brevemente:

- **Sensores electroquímicos:** utilizan una enzima (lactato oxidasa) que reacciona con el lactato presente en el sudor, generando una corriente eléctrica proporcional a la concentración. Son sensibles, rápidos y adecuados para su integración en parches o textiles inteligentes.
- **Sensores ópticos:** se basan en reacciones químicas que provocan un cambio de color o fluorescencia proporcional al lactato presente. Aunque menos frecuentes, ofrecen ventajas en términos de estabilidad y compatibilidad con sensores ópticos multianálisis.

Ambas tecnologías deben superar desafíos relacionados con la interferencia de otros componentes del sudor, la variabilidad en la tasa de sudoración, la calibración individual y la sensibilidad a factores ambientales como la temperatura, el pH o el flujo.

Principios de funcionamiento

El sudor, aunque no refleja directamente la concentración sanguínea de lactato, permite estimar las tendencias metabólicas del organismo, especialmente cuando se lo monitoriza en tiempo real. En condiciones de ejercicio incremental, la concentración de lactato en el sudor aumenta de forma paralela al esfuerzo, con un patrón que puede correlacionarse con los cambios observados en sangre.

La tecnología *wearable* para medir lactato en sudor suele utilizar sensores adheridos a la piel mediante adhesivos transpirables, ubicados en zonas de alta sudoración —frente, espalda o brazos—. El sistema detecta la presencia de lactato y transmite los datos a una *app* móvil o plataforma digital, donde se interpreta la curva de respuesta.

En este proceso, se consideran distintos factores. Entre ellos, se destacan los siguientes:

- Tasa de sudoración y retraso entre la producción y la lectura.
- Tiempo de saturación del sensor.
- Corrección de datos en función del pH y la temperatura dérmica.
- Algoritmos de aprendizaje que ajustan los valores al perfil individual del usuario.

Dispositivos disponibles en el mercado

Actualmente, existen pocos dispositivos comerciales plenamente validados, pero el campo está en plena expansión. Uno de los referentes emergentes es el dispositivo Onasport, desarrollado por la empresa Onalabs. Este sensor portátil permite estimar el lactato sanguíneo en tiempo real a partir del sudor, con integración en plataformas móviles y con validaciones preliminares prometedoras.

Otros desarrollos, aún en fase experimental o de investigación, incluyen los siguientes:

- Biosensores adhesivos integrados en textiles, utilizados en estudios con ciclistas y corredores.
- Parches electrónicos de lactato con transmisión Bluetooth, presentados en congresos internacionales de fisiología del ejercicio.
- Dispositivos híbridos que combinan la medición de lactato y glucosa, pensados para triatletas y deportes de larga duración.

La mayoría de estos dispositivos están siendo validados frente a medidores clásicos como el Lactate Pro 2, el Lactate PLUS o analizadores portátiles de referencia, con el objetivo de establecer relaciones entre las curvas de lactato en sudor y en sangre capilar.

Estudios sobre su precisión



Los estudios de validación en condiciones reales aún son limitados, pero algunos trabajos han mostrado lo siguiente:

- Buena correlación entre la curva de lactato en sudor y el punto de inflexión metabólico (LT1 y LT2), especialmente cuando se ajusta por la tasa de sudoración.
- Diferencias entre individuos que obligan a realizar una calibración personalizada por deportista.
- Posible influencia del estado de hidratación y la temperatura ambiente en la sensibilidad del sensor.
- Un desfase temporal entre el cambio metabólico interno y la lectura periférica, generalmente de entre 30 y 90 segundos.

Aunque todavía no pueden sustituir por completo a los métodos invasivos en contextos clínicos o de laboratorio, estos dispositivos representan una herramienta muy útil para el seguimiento diario del entrenamiento, la detección de zonas de carga excesiva y la programación personalizada en deportes de resistencia.

Aplicaciones prácticas en el entrenamiento

La incorporación de sensores de lactato no invasivos en el día a día del entrenamiento ofrece diversas posibilidades. Entre ellas, se destacan las siguientes:

- Realizar *test* incrementales en campo sin necesidad de punciones, con identificación aproximada de umbrales individuales y pruebas de máximo estado estable del lactato.
- Estimar el grado de acumulación de lactato durante bloques de entrenamiento intenso, lo que facilita la modulación del volumen o la recuperación activa.
- Establecer alertas personalizadas de esfuerzo en tiempo real, útiles para deportes como ciclismo, remo, triatlón o *trail running*.
- Comparar sesiones similares a lo largo del tiempo, evaluando adaptaciones fisiológicas al entrenamiento aeróbico o mixto.
- Complementar otros datos, como pulso, VFC, carga mecánica o sensación subjetiva, en una visión más completa del esfuerzo.

Retroalimentación en tiempo real



Una de las principales fortalezas de los sensores *wearables* es su capacidad para ofrecer datos en tiempo real, sin necesidad de detener el ejercicio. Esto resulta especialmente valioso en entrenamientos de series, bloques largos o competiciones, donde el atleta puede recibir alertas sobre los siguientes aspectos:

- Alcance de una zona umbral individual.
- Acumulación de lactato superior al valor de referencia.
- Necesidad de reducir la intensidad o cambiar el estímulo.

Esta retroalimentación inmediata puede mejorar considerablemente la gestión de la carga interna y optimizar el rendimiento sin comprometer la continuidad del entrenamiento.

Limitaciones y desafíos técnicos

A pesar de su potencial, las tecnologías actuales para la medición de lactato en sudor enfrentan algunos desafíos. Entre los principales, se destacan los siguientes:

- **Interferencias químicas.** Otros metabolitos presentes en el sudor, como la urea, el sodio o la glucosa, pueden alterar la señal del sensor.
- **Variabilidad en la tasa de sudoración:** afecta la concentración del analito, especialmente en climas secos o fríos.
- **Adherencia cutánea y vida útil del sensor:** factores mecánicos o de sudoración pueden comprometer la lectura durante sesiones prolongadas.
- **Necesidad de calibración personalizada:** lo cual dificulta la implementación masiva sin soporte técnico.
- **Condiciones ambientales:** la temperatura, la humedad y la exposición al agua pueden afectar el funcionamiento y la respuesta del sensor.

Además, el desfase entre el esfuerzo y la lectura obliga a entrenadores y atletas a interpretar los datos no como valores absolutos, sino como tendencias dinámicas que deben contextualizarse.

Influencia de factores externos

Entre los factores que afectan la precisión de estas tecnologías encontramos los siguientes:

- El **grado de hidratación**, que modifica la composición del sudor.



- La **temperatura ambiente**, que influye en la tasa de sudoración y en la sensibilidad del sensor.
- La **posición del sensor**, que puede modificar la lectura si se instala sobre zonas de baja transpiración.
- El **nivel de aclimatación al calor**, que afecta la respuesta sudoral individual.

Estos factores deben considerarse tanto en el diseño del dispositivo como en su aplicación práctica, para garantizar una interpretación válida y útil de los datos obtenidos.

Ejemplo práctico: uso de sensores de lactato durante el ejercicio

En el presente ejemplo práctico, se muestran dos pruebas de ejercicio físico realizadas a diferentes intensidades, con el objetivo de evaluar y comparar la respuesta del lactato durante la actividad física. Para la monitorización continua de los niveles de lactato, se utilizó un medidor continuo de lactato en sudor: un dispositivo *wearable* que permite registrar las fluctuaciones de lactato en tiempo real, con actualizaciones minuto a minuto.

A diferencia de las mediciones tradicionales de lactato sanguíneo —que requieren punciones capilares y ofrecen datos puntuales—, el monitor continuo permite una evaluación constante y no invasiva, lo que facilita la identificación de patrones y respuestas metabólicas durante y después del ejercicio.

En las pruebas realizadas, se evaluaron dos intensidades distintas de ejercicio, diseñadas para representar:

- Esfuerzos de larga duración y baja intensidad (por ejemplo, maratón).
- Esfuerzos de corta-media duración y alta intensidad (por ejemplo, HIIT).

El objetivo fue observar cómo varían los niveles de lactato según el tipo de ejercicio físico. Esta comparación resulta fundamental para comprender mejor la dinámica del metabolismo energético y su regulación durante la actividad.

- **Prueba 1: larga duración + baja intensidad**

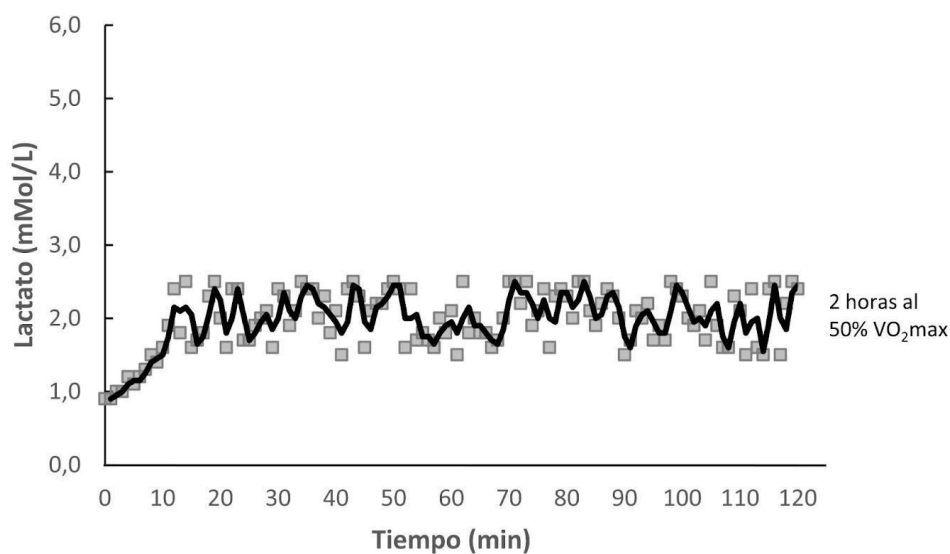
La primera prueba consiste en una sesión de ejercicio aeróbico a baja intensidad, durante la cual el sujeto realiza una carrera continua durante un periodo de dos horas. La intensidad del ejercicio se estableció en un 50 % del $VO_2\text{max}$, lo que corresponde a un nivel de esfuerzo ligero. Esta intensidad se seleccionó con el propósito de evaluar cómo se comporta el lactato durante un ejercicio prolongado pero no excesivamente exigente, permitiendo observar la regulación metabólica en condiciones de demanda constante y moderada.



Durante la prueba, los sujetos mantuvieron un ritmo de carrera constante, asegurándose de que la carga de trabajo se mantuviera estable y acorde al porcentaje definido del VO_2max .

El siguiente gráfico representa la concentración de lactato (medida en mmol/L) a lo largo del tiempo durante una prueba de ejercicio sostenido a una intensidad moderada del 50 % del VO_2max , con una duración total de 120 minutos.

Figura 1. Ejemplo representativo de la evolución del lactato durante una prueba de ejercicio de dos horas a una intensidad constante del 50 % del VO_2max



Fuente: elaboración propia

Este nivel de esfuerzo está típicamente por debajo del umbral anaeróbico en individuos sanos y entrenados, lo que significa que el cuerpo puede suministrar suficiente oxígeno a los músculos para satisfacer la demanda energética, manteniendo el lactato en niveles bajos.

El lactato aumenta ligeramente durante los primeros minutos —fase inicial de ajuste metabólico—, hasta que posteriormente se estabiliza (*steady state*) en un nivel bajo o moderado durante las dos horas de ejercicio. No se produce una acumulación progresiva y significativa de lactato, ya que la tasa de producción es similar a la de aclaramiento (eliminación).

Aunque es poco probable superar los 4,0 mmol/L de manera sostenida a esta intensidad, cabe la posibilidad de que individuos poco entrenados alcancen el umbral anaeróbico en la parte final de la prueba.

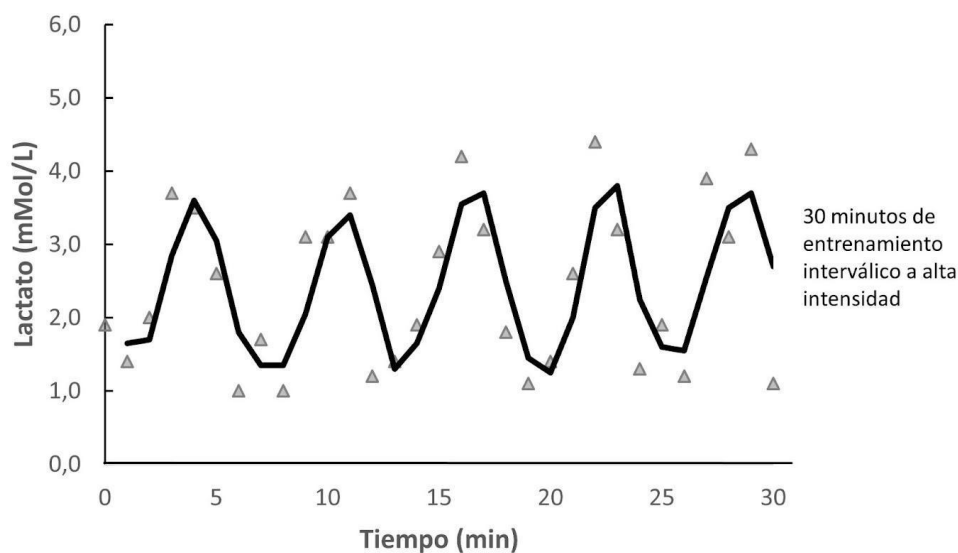
A nivel metabólico, estos datos ejemplifican que, a intensidades moderadas —por debajo del umbral anaeróbico—, el metabolismo es predominantemente aeróbico. Los carbohidratos y las grasas se oxidan de forma eficiente utilizando oxígeno para sintetizar energía, y el lactato producido en algunas fibras musculares se reutiliza como combustible, lo que permite mantener concentraciones sanguíneas bajas.

- **Prueba 2: media duración + alta intensidad**

La segunda prueba consiste en una sesión de ejercicio interválico a alta intensidad, durante la cual el sujeto realiza una carrera de 30 minutos, alternando periodos de esfuerzo intenso y recuperación en bloques de 2 minutos. La intensidad se estableció en un 90 % del $VO_2\text{max}$, lo que corresponde a un nivel de esfuerzo vigoroso. Esta intensidad se seleccionó con el propósito de evaluar cómo se comporta la glucosa intersticial durante un ejercicio de alta demanda.

El siguiente gráfico ejemplifica los niveles de lactato (medidos en mmol/L) a lo largo del tiempo durante esta sesión, en la que se alternan bloques de alta intensidad y recuperación, durante un periodo total de 30 minutos.

Figura 2. Ejemplo representativo los niveles de lactato durante una prueba de ejercicio de 30 minutos a intensidades variables



Fuente: elaboración propia

En la figura se observa cómo el lactato exhibe picos abruptos durante cada intervalo de alta intensidad, seguidos de descensos parciales en las fases de recuperación, con una tendencia ascendente acumulativa a lo largo de la sesión. Esto ocurre porque cada intervalo intenso supera el umbral anaeróbico, activando masivamente la glucólisis anaeróbica y generando lactato a un ritmo mayor que el de su eliminación o reciclaje.

Durante las pausas, el aclarado y reciclaje del lactato reducen parcialmente los niveles, pero sin retornar a la línea base, lo que resulta en una acumulación progresiva.

Este perfil oscilante y creciente contrasta claramente con la estabilidad observada en ejercicios aeróbicos continuos, y evidencia la mayor dependencia de vías anaeróbicas, así como la capacidad del HIIT para inducir adaptaciones fisiológicas, como la mejora de la tolerancia al lactato y la eficiencia tampón.

En resumen, ambos gráficos ilustran respuestas metabólicas opuestas ante diferentes estímulos de ejercicio. Mientras el primer protocolo muestra una estabilidad notable del lactato sanguíneo (entre 1 y 3 mmol/L), reflejando un equilibrio aeróbico en el que la producción y eliminación de lactato se mantienen en balance durante esfuerzos prolongados y moderados, el segundo protocolo presenta un patrón oscilante y acumulativo, con picos recurrentes en cada intervalo y recuperaciones incompletas que generan una tendencia ascendente.

Esta diferencia clave surge porque la intensidad moderada del primer caso se mantiene por debajo del umbral anaeróbico, lo que permite un metabolismo oxidativo sostenible; en cambio, el HIIT supera repetidamente dicho umbral, activando la glucólisis anaeróbica y saturando los sistemas de aclarado y reciclaje.

Así, el primer perfil favorece adaptaciones de resistencia aeróbica y eficiencia energética, mientras que el segundo induce un estrés metabólico agudo que contribuye a mejorar la tolerancia al lactato, la capacidad tampón y la potencia anaeróbica.

El monitoreo continuo del lactato a través del sudor permite detectar estas tendencias con alta resolución temporal, lo que resulta fundamental para comprender la dinámica metabólica durante el ejercicio.

Reflexión final del bloque

La evolución de las tecnologías *wearables* para la medición no invasiva del lactato representa un avance importante en el campo de las ciencias del deporte y la fisiología aplicada. Estos dispositivos ofrecen la posibilidad de monitorizar en tiempo real, y sin interrupciones, la respuesta metabólica del atleta durante una prueba de esfuerzo, un entrenamiento o una competición, facilitando una gestión más precisa y personalizada de la carga interna.

Aunque aún enfrentan desafíos técnicos relevantes —como la variabilidad fisiológica individual, la interferencia de otros componentes del sudor y las condiciones ambientales—, el potencial de estas tecnologías para proporcionar retroalimentación inmediata y continua puede mejorar la eficiencia del entrenamiento, abriendo nuevas vías para optimizar el rendimiento y la salud del deportista. No obstante, es fundamental que su aplicación se acompañe de una interpretación cuidadosa y contextualizada de los



datos.

Sensores de hidratación y electrolitos

Sensores de hidratación y electrolitos en tiempo real

El estado de hidratación es un factor determinante para el rendimiento físico, la salud del atleta y la prevención de riesgos durante la actividad deportiva, especialmente en ambientes calurosos o durante esfuerzos prolongados. Las pérdidas de agua y electrolitos a través del sudor pueden afectar negativamente la capacidad de termorregulación, el volumen plasmático, la función neuromuscular y el metabolismo energético.

En este contexto, los sensores *wearables* para la monitorización del estado de hidratación representan una de las áreas más innovadoras de la tecnología deportiva. Estos dispositivos permiten una estimación en tiempo real de los siguientes parámetros:

- La cantidad total de sudor.
- La tasa de sudoración individual.
- La pérdida de sodio y otros electrolitos (como potasio, cloro y magnesio).

Su propósito es proporcionar información precisa y continua para ajustar la hidratación durante la actividad, reducir el riesgo de deshidratación o hiponatremia y personalizar estrategias de reposición según las características fisiológicas del deportista.

Tecnologías para medir pérdida de líquidos

Las tecnologías actuales para cuantificar la pérdida hídrica se basan en distintas estrategias. A continuación, se describen las principales:

- **Sensores de conductividad eléctrica.** Miden la conductancia del sudor para inferir su concentración salina. A mayor concentración, mayor conductividad. Son útiles para estimar indirectamente el nivel de hidratación.
- **Biosensores integrados en parches cutáneos:** dispositivos portátiles que recogen sudor, lo conducen a través de microcanales y utilizan reacciones químicas o eléctricas para analizar su composición. Algunos modelos ofrecen salida visual (cambio de color) o conectividad digital.
- **Impedancia bioeléctrica localizada:** tecnología emergente basada en el análisis de la resistencia del tejido corporal a una corriente eléctrica débil, lo que permite estimar cambios en el contenido hídrico. Es más utilizada en dispositivos de



medición corporal total, aunque se encuentra en desarrollo para formatos portátiles.

- **Cámaras térmicas e imagen espectroscópica:** técnicas experimentales que detectan cambios en la piel asociados a la pérdida de agua o sales; aún se encuentran en fase de laboratorio.

Entre los dispositivos más avanzados se encuentran los desarrollados por empresas como Epicore Biosystems, que han creado parches inteligentes capaces de estimar la tasa de sudoración, la pérdida de electrolitos y la temperatura cutánea. Estos dispositivos se están validando en atletas de élite y personal militar.

Monitoreo de sodio y otros minerales

La concentración de sodio en el sudor varía ampliamente entre individuos (de 20 a 80 mmol/L) y está influida por factores genéticos, estado de aclimatación, dieta, nivel de entrenamiento y duración del esfuerzo. La pérdida excesiva de sodio sin una reposición adecuada puede provocar calambres, fatiga precoz y, en casos extremos, hiponatremia.

Los sensores de electrolitos permiten:

- detectar perfiles individuales de pérdida salina, fundamentales para diseñar estrategias de hidratación personalizadas;
- estimar la cantidad total de sodio perdido durante una sesión, en función de la tasa de sudoración y la duración del esfuerzo;
- ajustar la composición de las bebidas deportivas para que incluyan la cantidad adecuada de sodio, potasio o magnesio;
- prevenir desequilibrios hidroelectrolíticos que puedan comprometer el rendimiento o la salud.

Además del sodio, algunos sensores están siendo desarrollados para medir otros iones clave, como el cloruro (Cl^-), el potasio (K^+) y el calcio (Ca^{2+}), que cumplen funciones esenciales en la contracción muscular, el equilibrio ácido-base y la función neurológica.

Precisión y confiabilidad de las mediciones en condiciones reales

Uno de los mayores retos tecnológicos consiste en garantizar la precisión y repetibilidad de las mediciones en condiciones de práctica deportiva real, donde factores como el movimiento, la sudoración intermitente, la temperatura ambiental o el roce con la ropa pueden interferir con la calidad de los datos.

Las investigaciones actuales se centran en:



- mejorar los materiales del sensor para que sean biocompatibles, transpirables y estables a lo largo del tiempo;
- integrar mecanismos de calibración automática que ajusten la lectura en función del pH, la temperatura o el caudal de sudor;
- implementar algoritmos de corrección en la *app* para filtrar datos erróneos y ofrecer curvas interpretables;
- asegurar que la lectura no se vea afectada por la contaminación del sudor (por ejemplo, restos de crema solar o polvo).

Pese a estos desafíos, los resultados preliminares son prometedores, y los sensores actuales ya permiten una aproximación suficientemente útil para el entorno deportivo.

Validación científica de los dispositivos

Los dispositivos comerciales deben someterse a rigurosos procesos de validación comparativa frente a métodos estándar, como la recolección gravimétrica del sudor (medición del peso corporal antes y después del ejercicio), el análisis químico de muestras de sudor en laboratorio o la comparación con marcadores de laboratorio (osmolaridad plasmática, hematocrito).

Algunos estudios recientes indican lo siguiente:

- Existe una alta correlación entre la estimación de pérdida de líquidos mediante parches inteligentes y la recolección clásica por peso.
- Las estimaciones del contenido de sodio son aceptables, con un margen de error inferior al 10 % en condiciones de laboratorio.
- Se observan limitaciones en ejercicios intermitentes o de corta duración, donde la tasa de sudoración no es estable.

Es necesario seguir validando estas tecnologías en diferentes deportes, climas, perfiles fisiológicos y tipos de ropa deportiva para ampliar su aplicabilidad.

Factores que afectan la exactitud

Entre los principales factores que pueden alterar la precisión de los sensores de hidratación y electrolitos se incluyen los siguientes:

- **Zona de colocación del sensor.** El sudor no es homogéneo en todo el cuerpo; zonas como la frente o la parte superior de la espalda son más fiables.
- **Velocidad de sudoración:** si el flujo de sudor es bajo, la medición puede ser menos representativa o tener mayor error por evaporación.



- **Nivel de entrenamiento:** los atletas entrenados tienden a perder más agua y menos sodio, lo que afecta la interpretación de los datos.
- **Uso de ropa técnica o compresiva,** que puede alterar la ventilación cutánea y la recogida de sudor.

Estos factores deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados y al diseñar protocolos de entrenamiento o hidratación personalizados.

Aplicaciones en deportes de resistencia y alta intensidad

Los sensores de hidratación tienen especial relevancia en ciertas disciplinas, como las que se mencionan a continuación:

- **Triatlón, ciclismo, ultramaratón y trail running.** La pérdida de líquidos y sodio puede ser masiva y comprometer el rendimiento.
- **Deportes de equipo en climas cálidos (fútbol, rugby, hockey).** Se requiere una estrategia grupal e individualizada de hidratación.
- **Crossfit y entrenamientos funcionales de alta intensidad.** El control del estado hidroelectrolítico puede reducir el riesgo de calambres o fatiga.

En estos contextos, los sensores permiten no solo monitorizar el estado en tiempo real, sino también generar perfiles individuales de pérdida, útiles para ajustar planes de hidratación futura, bebidas personalizadas o programas de aclimatación al calor.

Prevención de calambres y deshidratación

Uno de los objetivos principales de la monitorización del sudor es reducir la incidencia de calambres musculares, que muchas veces están asociados a desequilibrios hidroelectrolíticos, especialmente de sodio y potasio. La personalización del contenido salino en las bebidas deportivas puede:

- mejorar la función neuromuscular bajo fatiga;
- evitar reducciones drásticas en el volumen plasmático;
- disminuir el riesgo de colapsos pos ejercicio por hiponatremia dilucional.

Además, ajustar los planes de hidratación permite mantener el rendimiento en sesiones prolongadas, prevenir el aumento excesivo de la frecuencia cardíaca y mejorar la percepción subjetiva del esfuerzo.

Personalización de estrategias de hidratación



Los datos recogidos por los sensores permiten elaborar perfiles de pérdida para cada deportista. Entre estos datos se incluyen los siguientes:

- Tasa media de sudoración (en L/h).
- Concentración media de sodio en el sudor (en mmol/L).
- Condiciones ambientales del entrenamiento.
- Estado inicial de hidratación (medido con herramientas complementarias como densidad urinaria o bioimpedancia).

Con esta información, los nutricionistas y entrenadores pueden establecer protocolos precisos de hidratación antes, durante y después del ejercicio, adaptados a la sesión, el entorno y el deportista.

Futuro de los sensores bioquímicos portátiles

El desarrollo de sensores que midan múltiples biomarcadores a la vez es una de las líneas de investigación más prometedoras. Se espera que los nuevos dispositivos puedan:

- medir simultáneamente lactato, glucosa, sodio, cortisol y temperatura;
- integrarse en textiles inteligentes sin necesidad de componentes rígidos;
- utilizar inteligencia artificial para predecir estados de deshidratación antes de que aparezcan síntomas;
- conectarse automáticamente a *apps* que generen recomendaciones personalizadas de bebida, nutrición y descanso.

Estas innovaciones podrían transformar la manera en que los entrenadores planifican las sesiones, los atletas se preparan y los servicios médicos deportivos previenen problemas asociados al balance hídrico.

Integración con otros parámetros fisiológicos

La integración de los datos de hidratación con otras métricas recogidas por *wearables* (frecuencia cardíaca, VFC, temperatura, glucosa, potencia, etc.) permite construir un modelo fisiológico integral del deportista. Esto facilita:

- detectar signos precoces de fatiga térmica o cardiovascular;
- evaluar la interacción entre deshidratación y rendimiento metabólico;



- identificar combinaciones de factores que aumentan el riesgo de lesión o mal rendimiento.

La integración multidimensional de datos, junto con el análisis longitudinal y contextualizado, es el camino hacia una monitorización verdaderamente personalizada.

Potencial en medicina y salud pública

Más allá del alto rendimiento, los sensores de hidratación pueden tener aplicaciones concretas en diversos ámbitos. Entre ellos, se destacan los siguientes:

- Prevención de golpes de calor en poblaciones vulnerables (trabajadores al aire libre, personas mayores, niños).
- Seguimiento de pacientes con insuficiencia cardíaca o renal, donde el balance hídrico es crítico.
- Control de hidratación en personas con disautonomía o enfermedades metabólicas.
- Promoción de hábitos saludables en la población general mediante educación personalizada y gamificación.

Esto convierte a los sensores de hidratación y electrolitos en una herramienta con potencial impacto más allá del deporte, con utilidad clínica, laboral y preventiva.

Ejemplo práctico: uso de sensores de deshidratación durante el ejercicio

En el presente ejemplo, se muestra una prueba de esfuerzo cuyo objetivo es evaluar la respuesta de la tasa de sudoración durante el ejercicio físico. Para la monitorización continua de los niveles de sudoración, se utilizó un biosensor de parche cutáneo: un dispositivo *wearable* que permite registrar las fluctuaciones en la tasa de sudoración en tiempo real, con actualizaciones minuto a minuto.

Esta prueba de esfuerzo, de carácter máximo y progresivo, se utiliza comúnmente para evaluar a ciclistas o deportistas en laboratorio. Su objetivo principal es determinar la capacidad fisiológica integral del individuo, incluyendo su consumo máximo de oxígeno ($VO_2\text{max}$); identificar umbrales metabólicos clave, como el umbral aeróbico y el anaeróbico; evaluar la respuesta cardiovascular (frecuencia cardíaca, presión arterial), ventilatoria y perceptiva al ejercicio incremental; y establecer zonas de entrenamiento personalizadas.

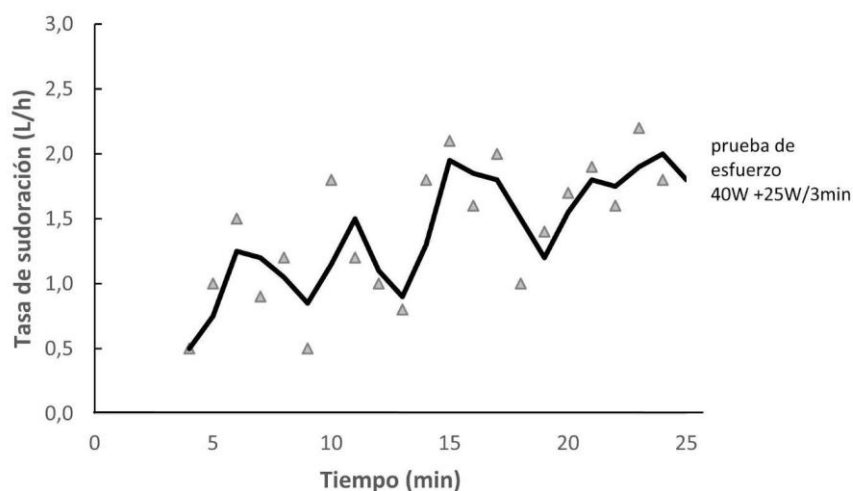


El protocolo comienza con un calentamiento específico. Inmediatamente después, se inicia la fase de carga incremental: el sujeto parte pedaleando a 90 RPM, con una cadencia estrictamente controlada y mantenida, y una carga inicial de 40 vatios (W). Cada 3 minutos, la carga de trabajo se incrementa en 25 W, manteniendo siempre la cadencia fija en 90 RPM.

Este incremento escalonado continúa de manera sucesiva (40 W, 65 W, 90 W, 115 W, 140 W, etc.), sin pausa entre etapas. El sujeto debe continuar hasta alcanzar el agotamiento voluntario máximo, definido como el punto en el que es incapaz de mantener la cadencia de 90 RPM a pesar del máximo esfuerzo (generalmente cayendo por debajo de 85 RPM), o no puede continuar por fatiga extrema, síntomas adversos o indicación del técnico.

El siguiente gráfico representa la tasa de sudoración (medida en L/h) a lo largo del tiempo durante una prueba de esfuerzo, con una duración total de 25 minutos.

Figura 3. Ejemplo representativo de la evolución de la tasa de sudoración durante una prueba de esfuerzo en cicloergómetro



Fuente: elaboración propia

Al comienzo de la prueba, la tasa de sudoración es de aproximadamente 1,0 L/h, lo que refleja una demanda térmica relativamente baja. A medida que avanza el ejercicio, la tasa de sudoración aumenta de forma constante, alcanzando valores de entre 1,5 y 2,0 L/h durante la fase intermedia (de 6 a 15 minutos).

En la fase final de la prueba, la tasa de sudoración se estabiliza en niveles más altos, fluctuando entre 1,8 y 2,2 L/h. Estos valores corresponden a las cargas de trabajo máximas y reflejan un mayor estrés térmico en el cuerpo.

En general, los datos indican que la tasa de sudoración aumenta casi proporcionalmente a la intensidad del ejercicio, lo que concuerda con la respuesta termorreguladora del organismo, destinada a mantener el equilibrio térmico frente a un esfuerzo físico creciente.

Reflexión final del bloque

Los sensores *wearables* para el monitoreo en tiempo real de la deshidratación y los electrolitos representan una innovación importante para mejorar el rendimiento y la salud de los atletas. Permiten ajustar la ingesta de líquidos de manera personalizada, prevenir la deshidratación y los desequilibrios minerales, y optimizar la recuperación.

Aunque aún enfrentan desafíos técnicos y variables individuales que afectan su precisión, el avance en materiales y algoritmos promete superar estas limitaciones.

Referencias bibliográficas de consulta

- Baker, L. B.** (2017). *Sweat testing methodology in the field: Challenges and best practices*. *Sports Science Exchange*, 30(172), 1–7.
- Baker, L. B., Kenney, W. L., Lewis, D. R., & Wingo, J. E.** (2016). *Influence of ambient temperature and exercise intensity on body fluid balance*. *Journal of Applied Physiology*, 121(4), 798–806. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00347.2016>
- Bandodkar, A. J., Jeerapan, I., You, J.-M., Hossain, S., Shanmugam, M., Wang, Y., & Gao, W.** (2019). *Sweat sensors: A novel platform for wearable diagnostics*. *Accounts of Chemical Research*, 52(3), 561–572.
- Coyle, E. F.** (2007). *Physiological regulation of marathon performance*. *Sports Medicine*, 37(4–5), 306–311.
- Gao, W., Emaminejad, S., Nyein, H. Y. Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., Fahad, H. M., Ota, H., Shiraki, H., Kiriya, D., Lien, D. H., Brooks, G. A., Davis, R. W., & Javey, A.** (2016). *Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis*. *Nature*, 529(7587), 509–514. <https://doi.org/10.1038/nature16521>
- Kim, J., Ieran, A., Liu, X., Dudek, H., Mackanos, E., Zhang, X., Torres, M., Jones, M., Ciarlo, M., Issa, N., & Wang, J.** (2019). *Wearable bioelectronics for personalized sweat analytics*. *Science Advances*, 5(11), eaax0649. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0649>



- Khurana, S., Yadav, S., Pant, A., & Tripathi, A.** (2022). *Lactate biosensors: Current status and future prospects*. *Biosensors and Bioelectronics*, 208, 114192. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114192>
- Lee, H., Gao, W., Emaminejad, S., Christensen, D., Yin Nyein, H. Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., Ghaderi, H., Ota, H., Shiraki, H., Kiriya, D., Lien, D. H., Brooks, G. A., Davis, R. W., & Javey, A.** (2018). *A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for real-time sweat analysis*. *Science Advances*, 4(11), eaar3921. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar3921>
- Liu, G., Yan, Y., Yang, Q., Zhang, Z., Chen, X., Wu, J., & Wang, Z.** (2021). *Enzymatic wearable biosensors for sweat lactate monitoring*. *ACS Sensors*, 6(6), 2092–2101. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c01009>
- Onalabs Team,** (2023). *Non-invasive real-time monitoring of lactate and sodium through epidermal sensors in endurance cyclists* [archivo inédito].
- Patterson, J. T., Smith, R., Chen, K., & Gao, W.** (2022). *Emerging wearable biosensor technologies for real-time sweat monitoring*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 869374.
- Peri-Okonny, P. A., Lee, H., Wang, J., & Gao, W.** (2022). *Wearable sweat sensors for personalized hydration strategies*. *Current Opinion in Electrochemistry*, 34, 100985. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.100985>
- Rogers, J. A., Kovacs, G., Chung, H.-U., Russel, L., Chen, J., Wang, S., Zhao, Y., Lu, N., Kim, D.-H., & Xia, Y.** (2019). *Skin-interfaced microfluidic systems for sweat collection and analysis*. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 21, 1–25.

