

Metodología de determinación de la transición aeróbica-anaeróbica en la evaluación funcional

Raúl Domínguez¹, Manuel V Garnacho-Castaño², José L Maté-Muñoz¹

¹Departamento de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Universidad Alfonso X El Sabio. Madrid. ²TecoCampus Mataró-Maresme. Escuela Superior de Ciencias de la Salud. Universidad Pompeu Fabra. Barcelona.

Recibido: 28.08.2015

Aceptado: 10.12.2015

Resumen

El consumo de oxígeno máximo ($VO_{2m\acute{a}x}$) es considerado el parámetro más importante en la determinación de la capacidad funcional de una persona. Como consecuencia del gran estrés que supone la realización de pruebas de esfuerzo con un carácter máximo, se ha buscado la valoración de la capacidad funcional a través de pruebas con un carácter submáximo, siendo el *umbral láctico* (UL) el parámetro más estudiado. Se han propuesto diversas metodologías en la determinación del UL, si bien, aquellas metodologías que asocian el UL a unas determinadas concentraciones fijas de lactato sanguíneo no parecen adecuadas, siendo la metodología más adecuada la del ajuste algorítmico. El UL indica el comienzo de una participación progresivamente mayor de la glucólisis anaeróbica al metabolismo energético, siendo conocida dicha intensidad de ejercicio como transición aeróbica-anaeróbica. El inicio de la transición aeróbica-anaeróbica, además de caracterizarse por un incremento de las concentraciones de lactato con respecto a los valores de reposo, se acompaña de un incremento desproporcional de la respuesta ventilatoria, electromiográfica y de activación del sistema nervioso simpático, en relación a los incrementos de la intensidad de ejercicio, que hasta ese momento habían mantenido una relación proporcional. De este modo, en el inicio de la transición aeróbica-anaeróbica se puede observar una respuesta de tipo umbral a nivel electromiográfico, que se conoce *umbral de electromiografía* (UE), en los niveles de catecolaminas en plasma, umbral de catecolaminas (UC), y de la ventilación pulmonar, *umbral ventilatorio* (VT1). A pesar de que la transición aeróbica-anaeróbica se ha estudiado ampliamente en ejercicios empleados para el desarrollo de la resistencia cardiorrespiratorio, recientemente se está estudiando en ejercicios empleados en el entrenamiento contrarresistencia, como la media sentadilla, donde las respuestas son similares a las observadas en cicloergómetro.

Key words:

Catecolaminas.
Electromiografía. Resistencia.
Umbral láctico.
Umbral ventilatorio.

Methodology to elucidate the aerobic-anaerobic transition in functional assessment

Summary

The maximum oxygen consumption ($VO_{2m\acute{a}x}$) is considered the most important parameter to determine the functional ability of a person. Due to the large stress involved in the maximum effort testing, the submaximal effort test have achieved a relevant role in the capacity functional assessment, being *lactic threshold* (UL) the parameter most studied. They have proposed different methodologies in determining the UL, although those who associate UL methodologies to certain fixed blood lactate concentrations considered inadequate, the most appropriate methodology of the algorithmic adjustment. The UL marks the beginning of a progressively greater share of the anaerobic glycolysis energy metabolism, being known that as exercise intensity aerobic-anaerobic transition. The onset of transition aerobic anaerobic also characterized by an increase in lactate concentrations over resting values, is accompanied by a disproportionate increase in ventilatory, electromyographic response and activation of the sympathetic nervous system in relation to increases the intensity of exercise, which until then had maintained a proportional relationship. Thus, at the start of the aerobic-anaerobic transition can observe a response threshold type to electromyographic level, the threshold for electromyography (EU) is known, in levels of plasma catecholamines, threshold catecholamines (UC), and pulmonary ventilation, ventilatory threshold (VT1). Although the aerobic-anaerobic transition has been studied extensively in exercises employed for the development of cardiorespiratory endurance, recently it is you studying exercises employed in contrarresistencia training, as the half-squat, where the responses are similar to those observed in I cycle ergometer.

Palabras clave:

Catecholamines.
Electromyography. Endurance.
Lactate threshold.
Ventilatory threshold.

Correspondencia: Raúl Domínguez

E-mail: rdomiher@uax.es

Introducción

El ejercicio de resistencia cardiorrespiratoria implica a los sistemas cardiovascular, pulmonar y muscular. El parámetro más empleado en la determinación de la capacidad de resistencia es el denominado *consumo de oxígeno máximo* ($VO_{2m\acute{a}x}$), al implicar a los tres sistemas anteriormente mencionados, debido a que esta medida fisiológica refleja *la cantidad máxima de oxígeno que un organismo es capaz de captar, transportar y consumir por unidad de tiempo*¹. Por ello, la *Organización Mundial de la Salud* (OMS) considera que el $VO_{2m\acute{a}x}$ es el parámetro más importante en la determinación de la capacidad funcional de una persona², asociándose bajos niveles de $VO_{2m\acute{a}x}$ con un aumento en el riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares como hipertensión, diabetes y síndrome metabólico³.

Debido al gran estrés que supone la realización de pruebas de esfuerzo con un carácter máximo, se ha buscado la valoración de la capacidad funcional y de adaptación al esfuerzo mediante pruebas con un carácter submáximo^{4,5}, siendo el umbral láctico (UL), definido como *la intensidad de ejercicio a partir de la cual comienzan a incrementarse las concentraciones de lactato con respecto a los valores de reposo durante una prueba incremental*⁶, el parámetro más empleado. El término umbral lleva implícito un cambio repentino y brusco, debido a que cualquier estímulo por debajo de dicha intensidad no es suficiente para desencadenar ningún tipo de respuesta⁶. Considerando que la cinética del lactato durante una prueba incremental comienza durante las primeras intensidades con un ligero descenso o estabilización en las concentraciones sanguíneas de lactato antes de observar un incremento progresivo⁷, algunos autores han considerado más apropiado el término *transición* que el de *umbral*⁸. Debido a que la intensidad en la que tiene lugar el UL supone el inicio de un incremento progresivo cada vez más creciente del metabolismo glucolítico anaeróbico al ejercicio^{9,10}, Kindermann⁹, decidieron emplear el término de *transición aeróbica-anaeróbica*. En este acontecimiento fisiológico, además del incremento mencionado en las concentraciones de lactato, se observa una respuesta similar (tipo umbral) a diferentes niveles, sugiriendo una respuesta global del organismo a la intensidad de ejercicio. Por ello, el objetivo del presente estudio ha consistido en la realización de una revisión bibliográfica sobre los diferentes estudios que han abordado el estudio de la transición aeróbica-anaeróbica en ejercicios empleados para el desarrollo de la resistencia cardiorrespiratoria.

Determinación del umbral láctico

El lactato es un subproducto de la glucólisis anaeróbica, motivo por el que el estudio de la respuesta de las concentraciones de lactato al ejercicio se considera un buen indicador de la contribución de la glucólisis anaeróbica al ejercicio. La determinación del UL requiere la realización de una prueba incremental en la que, tras cada intensidad de ejercicio se debe tomar una muestra de lactato sanguíneo. Posteriormente, tras extrapolar las concentraciones de lactato sanguíneo con respecto a la intensidad de ejercicio ante una gráfica, comprobamos que a las intensidades más bajas, generalmente, se observa un leve descenso o estabilización de las concentraciones de lactato hasta que se produce un punto de inflexión, a partir del cual se observa un aumento continuo y progresivo⁷.

Con el propósito de determinar de forma objetiva el punto de inflexión en la curva de lactato en relación a la intensidad de ejercicio, se han propuesto distintos criterios (Tabla 1). Davis¹¹ proponen que el UL se identifique como la intensidad de ejercicio a partir de la cual se observa un incremento sistemático en las concentraciones de lactato, mientras que Farrell¹² indentifican al UL como la intensidad de ejercicio que precede a dos incrementos sucesivos en las concentraciones de lactato durante una prueba incremental. Otros investigadores han propuesto determinar el UL como la intensidad de ejercicio que precede a incrementos de 0,2 mmol·L⁻¹ con respecto al valor más bajo observado durante un test incremental¹³, aumentos de 0,5 mmol·L⁻¹ con respecto a la intensidad precedente durante una prueba incremental¹⁴ o bien a valores superiores a 0,5 mmol·L⁻¹⁽¹⁵⁾ o 1 mmol·L⁻¹⁽¹⁶⁾ si tomamos como referencia los valores de reposo. Todos estos métodos de detección del UL denominadas metodologías de *inspección visual* presentan dos grandes limitaciones⁷: 1) la fiabilidad depende de la experiencia de los investigadores; 2) el UL únicamente se puede detectar en intensidades que hayan sido utilizadas durante la prueba incremental.

Otras metodologías han asociado el UL a la intensidad a la que se alcanzan unas concentraciones fijas de lactato durante una prueba incremental. De este modo, el UL se asociaría con aquella intensidad de ejercicio en la que se alcanzan 2 mmol·L⁻¹⁽⁹⁾, 2,2 mmol·L⁻¹⁽¹⁷⁾, 2,5 mmol·L⁻¹⁽¹⁸⁾, 3 mmol·L⁻¹⁽¹⁹⁾ o 4 mmol·L⁻¹⁽²⁰⁾ durante la realización de un test incremental. Estas metodologías presentan el inconveniente de que no consideran que las concentraciones de lactato en sangre pueden sufrir variaciones *interindividuales e intraindividuales* y es que, las concentraciones de lactato en sangre se verán directamente influidas por las reservas de glucógeno²¹, así como por otros factores como son el tipo de fibra muscular, la actividad enzimática lipolítica y glucolítica o la densidad capilar y mitocondrial que afectan directamente a la curva del lactato en sangre²².

Por tanto, la determinación del UL deberá hacerse en base a la curva de la cinética del lactato durante una prueba incremental y, con el objetivo de determinar las limitaciones de las metodologías de inspección visual el UL debería determinarse atendiendo a criterios matemáticos. De este modo, el UL se identificaría como el punto de corte de dos regresiones lineales (metodología de ajuste algorítmico) que, además de ser una metodología objetiva, permite determinar el UL en intensidades de trabajo que no han sido empleadas durante la realización del test incremental (Figura 1).

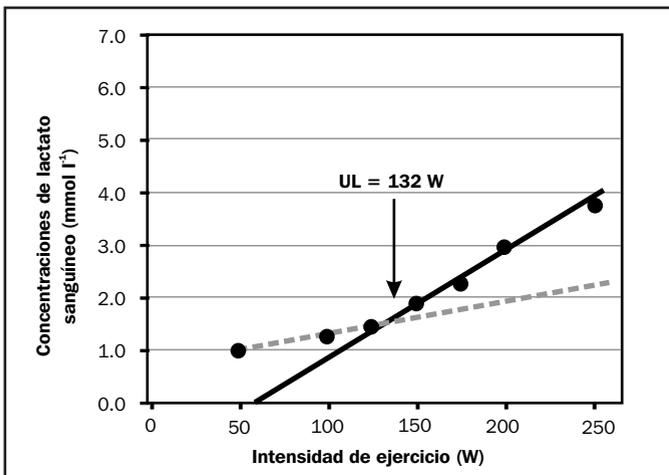
Al igual que existen diferentes metodologías de determinación del UL, éste ha recibido otras nomenclaturas en la literatura, habiéndose empleado términos como *umbral anaeróbico*⁹, *umbral aeróbico*¹⁰, *inicio de acumulación de lactato en sangre*^{12,18-20}, *mínimo equivalente de lactato*²³ o *lactato mínimo*²⁴ (Tabla 1), si bien, todos los términos hacen referencia al mismo concepto fisiológico.

A pesar de la importancia del $VO_{2m\acute{a}x}$, tanto en el rendimiento como en la salud, en deportistas de resistencia cardiorrespiratoria dicho parámetro no ha demostrado discriminar el rendimiento entre sujetos con un nivel similar²⁵, a diferencia del UL, que sí ha demostrado tener la sensibilidad de diferenciar el rendimiento en deportistas de resistencia cardiorrespiratoria con similar $VO_{2m\acute{a}x}$ ¹⁶. Ello ha llevado a que en modalidades de resistencia cardiorrespiratoria, el UL sea el indicador de rendimiento más importante^{26,27}, bien sea expresado en relación al

Tabla 1. Nomenclaturas empleadas para hacer referencia al umbral láctico y diferentes criterios para su determinación.

Nomenclatura	Criterio de detección
Umbral láctico	<p>Intensidad a partir de la cual se observa un incremento sistemático de las concentraciones de lactato durante una prueba incremental¹¹</p> <p>Intensidad en la que se produce un incremento de 0,5 mmol·L⁻¹ en las concentraciones de lactato con respecto al valor de reposo en una prueba incremental¹⁵</p> <p>Intensidad en la que se produce un incremento de 1 mmol·L⁻¹ en las concentraciones de lactato con respecto a las encontradas a una intensidad baja de ejercicio (40-60% VO_{2máx}) durante una prueba incremental³³</p> <p>Intersección entre la regresión exponencial de la curva del lactato con la bisectriz de las tangentes de la parte superior e inferior de la regresión³⁴</p> <p>Intensidad en la que se produce un incremento de 0,2 mmol·L⁻¹ en las concentraciones de lactato con respecto al valor más bajo en una prueba incremental¹³</p> <p>Intensidad que precede al primer incremento en las concentraciones de lactato con respecto a los valores de reposo en una prueba incremental³⁵</p> <p>Intensidad en la que tiene lugar un primer incremento en los niveles del lactato y que corresponde con el punto de intersección de 2 regresiones lineales en la cinética del lactato durante una prueba incremental³⁶</p> <p>Intensidad que precede a un incremento superior a 0,5 mmol·L⁻¹ de lactato con respecto a la carga anterior durante una prueba incremental¹⁴</p> <p>Intensidad que precede a aquella en la que se produce un incremento de 1 mmol·L⁻¹ en las concentraciones de lactato con respecto a los valores de reposo en una prueba incremental¹⁶</p>
Inicio de acumulación de lactato en sangre	<p>Intensidad que precede al inicio de 2 aumentos progresivos en las concentraciones de lactato en una prueba incremental¹²</p> <p>Intensidad en la que las concentraciones de lactato se asocian a un valor de 4 mmol·L⁻¹(²⁰)</p> <p>Intensidad en la que las concentraciones de lactato se asocian a un valor de 2,5 mmol·L⁻¹(¹⁸)</p> <p>Intensidad en la que las concentraciones de lactato se asocian a un valor de 3 mmol·L⁻¹(¹⁹)</p>
Umbral anaeróbico	Intensidad en la que las concentraciones de lactato se asocian a un valor de 2 mmol·L ⁻¹ (⁹)
Máximo estado estable	Intensidad en la que las concentraciones de lactato se asocian a un valor de 2,2 mmol·L ⁻¹ (¹⁷)
Lactato mínimo	Valor más bajo al representar las concentraciones de lactato en una regresión polinomial de 2º orden ²⁴
Mínimo equivalente de lactato	Intensidad en la que tiene lugar el valor más bajo en el cociente lactato·VO ₂ ⁻¹ durante una prueba incremental ²³

Figura 1. Determinación del UL durante la realización de una prueba incremental en cicloergómetro mediante una metodología de ajuste algorítmico.



% VO_{2máx}²⁸ o a la potencia o velocidad a la que tiene lugar^{29,30}. Además, debido a que la intensidad óptima para mejorar el UL es una intensidad próxima a él⁶, conlleva que dicha intensidad de ejercicio sea empleada para la programación del entrenamiento tanto en deportistas³¹ como en población sedentaria³² o con patología cardiovascular y/o pulmonar⁷.

Umbral ventilatorio

La valoración de la ventilación por minuto y el resto de parámetros respiratorios nos permite conocer el sustrato y el metabolismo empleado durante el ejercicio³⁷. Ante un ejercicio de tipo incremental, durante los primeros intervalos de trabajo la *ventilación por minuto* (VE), el *consumo de oxígeno* (VO₂) y el *dióxido de carbono* (VCO₂) aumentan de forma gradual hasta que se llega a una intensidad correspondiente al UL. El aumento de la glucólisis anaeróbica una vez alcanzado el UL conlleva a un aumento en la generación de protones resultantes de la disociación del ácido láctico que son tamponados, mayoritariamente, por el

Figura 2A. Determinación del VT1 a través de aquella intensidad de ejercicio en la que se observa un incremento desproporcional de la VE en relación a la intensidad de ejercicio durante una prueba de tipo incremental.

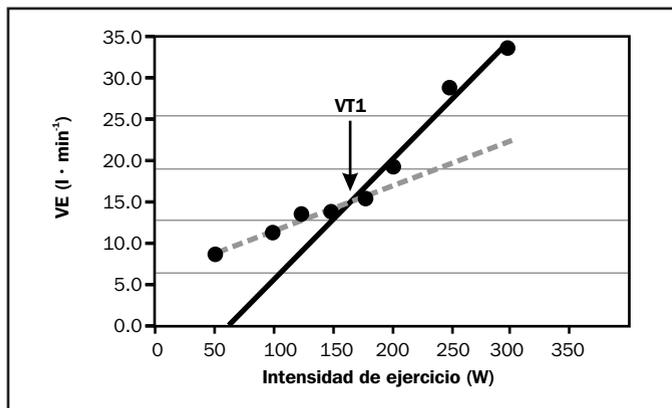


Figura 2B. Determinación del VT1 a través de aquella intensidad de ejercicio en la que el VCO₂ aumenta en mayor proporción que el VO₂ durante una prueba de tipo incremental.

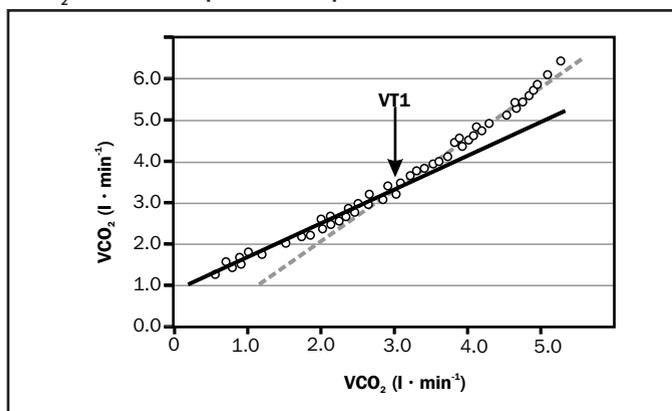
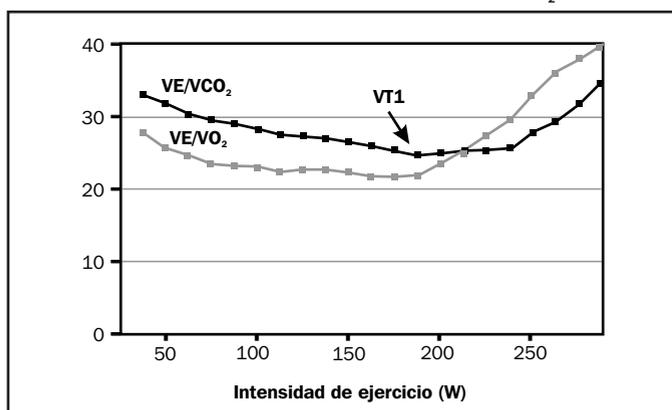


Figura 2C. Determinación del VT1 a través de aquella intensidad de ejercicio en la que se observa un incremento del VE·VO₂⁻¹ sin que se produzca un aumento concomitante en el VE·VCO₂⁻¹.



sistema del bicarbonato incrementando la producción de VCO₂^{5,38}. Esta situación metabólica estimula a los cuerpos carotídeos, aumentando la

VE de manera desproporcional con respecto a los anteriores incrementos en la intensidad de ejercicio³⁹ (Figura 2a). Ello ha dado lugar a que a la intensidad a la que se produce el UL, se pueda detectar también mediante ergoespiometría, el conocido como *umbral ventilatorio* (VT) o *primer umbral ventilatorio* (VT1).

El comportamiento del VO₂ durante una prueba incremental, es el de aumentar de forma proporcional a la intensidad de ejercicio. Al llegar a una intensidad de VT1, el desigual comportamiento del VO₂ (que muestra incrementos proporcionales a la intensidad de ejercicio) con respecto al VCO₂ (que aumenta de forma desproporcional en relación a los incrementos de la intensidad), ha llevado a que diferentes autores identifiquen a incrementos en la relación VCO₂·VO₂⁻¹^{18(40,41)} (Figura 2b) o incrementos desproporcionales en la *tasa de intercambio respiratorio* (RER)⁴² como criterios de detección del VT1.

Igualmente, la pérdida de la relación lineal entre la VE y el VCO₂, la intensidad de ejercicio, que no tiene lugar en el VO₂, ha dado lugar a otro criterio en la determinación del VT1 mediante el que éste coincide con la intensidad de ejercicio en la que se observan aumentos del *equivalente ventilatorio del oxígeno* (VE·VO₂⁻¹) sin que se produzcan cambios en el *equivalente ventilatorio del dióxido de carbono* (VE·VCO₂⁻¹) durante una prueba de tipo incremental⁴³ (Figura 2c).

Por último, no debemos obviar a otro parámetro respiratorio empleado en la determinación del VT1, como es la *presión parcial de oxígeno al final de la espiración* (PeTO₂). Durante una prueba de tipo incremental, el PeTO₂ se reduce constantemente hasta un punto en el que se produce una inflexión y comienza a incrementarse. El valor mínimo en el PeTO₂ refleja la mayor utilización relativa del oxígeno en la oxidación de sustratos en relación al VO₂ y, en definitiva, una mayor contribución del metabolismo aeróbico al metabolismo energético. Por tanto, se ha propuesto que la intensidad de ejercicio en la que el PeTO₂ muestra un valor más bajo sea un criterio válido en la determinación del VT1¹¹.

Meyer⁵ propone la combinación de criterios a la hora de determinar el VT1. Uniendo las diferentes metodologías que encontramos en la literatura, el VT1 se podría identificar como aquella intensidad de ejercicio en la que se produce un incremento desproporcional de la VE, RER, VCO₂, VE·VO₂⁻¹ sin aumentos concomitantes en el VE·VCO₂⁻¹, ni pérdida de la linealidad del VO₂ con respecto a los incrementos en la intensidad de ejercicio, al tiempo que el PeTO₂ registra los niveles más bajos antes de comenzar a incrementarse sistemáticamente (adaptado de Tabla 2).

En términos de rendimiento, mientras el VO_{2max} no se modifica en deportistas de resistencia cardiorrespiratoria entrenados⁴⁴, el %VO_{2max} en el que se sitúa el VT1 puede mejorar como respuesta al entrenamiento aún en deportistas de resistencia de élite^{45,46}. Además, en población deportista de resistencia el VT1 y UL discriminan el rendimiento entre deportistas con similar VO_{2max}¹⁶. Por tanto, al igual que el UL, el %VO_{2max} al que se encuentra el VT1 es un buen indicador de la capacidad de *fitness* y del nivel de adaptación al ejercicio^{5,25}, siendo este parámetro empleado en la programación del entrenamiento tanto en deportistas como en población sana o con patología cardiovascular o pulmonar³⁷. Además, la determinación, del VT1, a diferencia del UL presenta la ventaja de ser una metodología no invasiva⁴⁷.

Tabla 2. Nomenclaturas empleadas para hacer referencia al umbral ventilatorio y diferentes criterios para su determinación.

Nomenclatura	Criterio de detección
Umbral ventilatorio	Intersección de 2 regresiones en el que el eje x queda representado por VO_2 y el eje y por VCO_2 ⁴¹ Intensidad en la que $VCO_2 \cdot VO_2^{-1} > 1$ ⁴⁰ Intensidad en la que se asocia un menor valor a $PeTO_2$ ⁴⁸ Intensidad en la que se produce un incremento del VEO_2 y de VE ⁴
Umbral anaeróbico	Intensidad en la que se produce un primer incremento desproporcional del RER con respecto a la intensidad de ejercicio ⁴² Intensidad en la que se produce un incremento en VE y VCO_2 ³⁸ Intensidad en la que tiene lugar un primer incremento en el $PETO_2$ ¹¹ Intensidad en la que tiene lugar un incremento en el VEO_2 sin un aumento concomitante del $VECO_2$ ⁴³
Umbral aeróbico	Intensidad en la que se produce un primer incremento desproporcional de la VE ¹⁰

Umbral de catecolaminas

Los niveles sanguíneos de adrenalina y noradrenalina se consideran los principales marcadores del grado de activación del sistema nervioso simpático⁴⁹. A nivel metabólico, las catecolaminas estimulan la glucogénesis muscular y hepática. Durante una prueba incremental se observa que los niveles de adrenalina y noradrenalina en relación a la intensidad de ejercicio presentan un comportamiento paralelo a las concentraciones de lactato^{50,51}, presentando, una respuesta de tipo *umbral*, que ha dado lugar al denominado *umbral de catecolaminas* (UC)^{50,52} (Figura 3). El UC coincide con la intensidad de ejercicio a la que tiene lugar el UL^{53,54}, proponiéndose una relación de tipo causal. De este modo, el incremento de la actividad del sistema nervioso simpático estimularía la glucólisis anaeróbica, explicando el incremento de los niveles de lactato y el inicio de la denominada transición aeróbica-anaeróbica⁵⁵.

Umbral de electromiografía

Al monitorizar la actividad electromiográfica de los miembros inferiores durante el desarrollo de pruebas incrementales en cicloergómetro se ha observado que, a partir de una intensidad de ejercicio se produce

Figura 3. Determinación del umbral de catecolaminas, a través de aquella intensidad de ejercicio en la que tiene lugar un incremento desproporcional de los niveles de adrenalina en sangre, durante una prueba de tipo incremental en cicloergómetro.

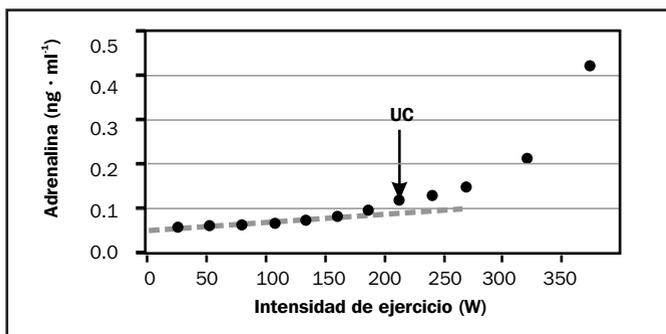
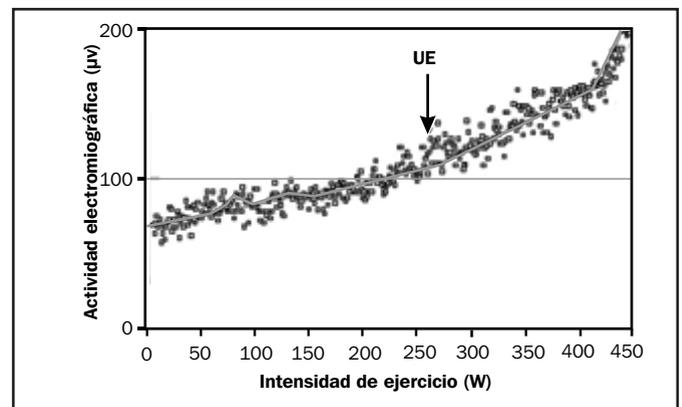


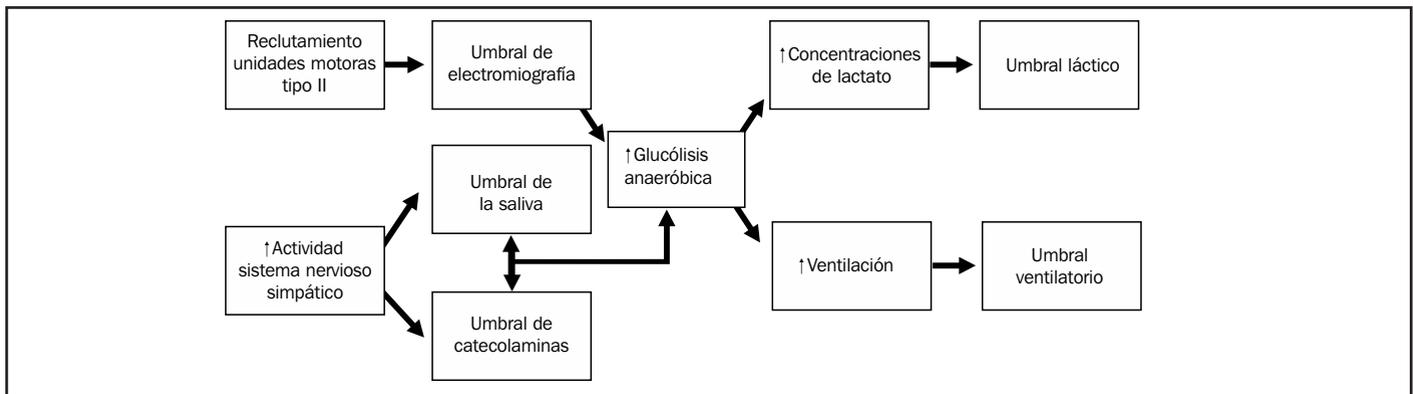
Figura 4. Determinación del umbral de electromiografía a partir del registro de la actividad eléctrica medida en el vasto lateral y recto femoral durante una prueba incremental en cicloergómetro.



un incremento desproporcionado de la actividad electromiográfica en relación a los aumentos en la intensidad de ejercicio^{56,57} que se ha denominado *physical working capacity at fatigue threshold* (PWC)^{58,59} o *umbral de electromiografía* (UE)^{60,61} (Figura 4). El aumento de la actividad electromiográfica se asocia con el inicio en el reclutamiento de unidades motoras tipo II al ejercicio⁶² y, la mayor actividad glucolítica de este tipo de unidades motoras^{63,64} explicaría que la intensidad a la que tiene lugar el UE coincida con aquella a la que tiene lugar el UL^{61,65} y el VT1^{60,61,66}.

Umbral de la saliva

Durante la realización de test incrementales progresivos se ha verificado modificaciones en la composición de la saliva, observando, un incremento desproporcional, tipo umbral, en relación a los incrementos en la intensidad de ejercicio, en los niveles de Na^+ y Cl^- que coincide con el UC⁶⁷ y el UL⁶⁸. La fuerte asociación encontrada entre el UC y el UL con la composición de los electrolitos presente en la saliva dio lugar a denominar a esa intensidad de ejercicio como *umbral de la saliva* (US)^{67,68}. Chicharro⁶⁹ propuso que el aumento de la actividad del sistema nervioso simpático es el responsable de modificar las tasas de absorción

Figura 5. Integración de la respuesta de los distintos umbrales propuestos para determinar la transición aeróbica-anaeróbica.

y reabsorción del Na⁺ y Cl⁻, siendo el origen del US. Posteriormente, se observó un comportamiento idéntico entre las concentraciones de amilasa salival y las de lactato en sangre, proponiéndose al punto de ruptura de las concentraciones de amilasa salival en relación a los incrementos de la intensidad de ejercicio, como una alternativa en la determinación del US⁷⁰.

A pesar de que la transición aeróbica-anaeróbica ha sido ampliamente estudiada en ejercicios empleados para el desarrollo de la resistencia cardiorrespiratoria, es necesario indicar que, actualmente, este parámetro fisiológico se está empleando en ejercicios utilizados en el entrenamiento contrarresistencia, como es el caso de la prensa de piernas⁷¹, el press de banca⁷² o la media sentadilla⁷³⁻⁷⁵. De este modo, se ha comprobado que, tanto en los ejercicios de media sentadilla⁷³⁻⁷⁵ como de prensa de piernas⁷¹ existe una correlación fuerte entre el UL y el VT1. Dado que, en test discontinuos a intensidad de UL en ejercicios contrarresistencia, concretamente en media sentadilla, se ha observado un estado estable en las concentraciones de lactato sanguíneo y de los parámetros respiratorios⁷³⁻⁷⁵ siendo este comportamiento similar al observado en una sesión de ejercicio de la misma intensidad (UL) y duración en cicloergómetro⁷³, se ha propuesto que el entrenamiento contrarresistencia a intensidad de UL podría ser un parámetro adecuado para desarrollar tanto la resistencia muscular localizada como la resistencia cardiorrespiratoria⁷³⁻⁷⁵ (Figura 5).

Conclusiones

La denominada transición aeróbica-anaeróbica indica el inicio de una respuesta global del organismo al ejercicio como consecuencia de una progresivamente mayor contribución de la glucólisis anaeróbica al metabolismo energético. En el inicio de la transición aeróbica anaeróbica, por tanto, se podrá identificar un incremento desproporcional con respecto a la intensidad del ejercicio de las concentraciones de lactato sanguíneo, actividad electromiográfica, tasa ventilatoria y activación del sistema nervioso simpático, con respecto a intensidades inferiores en las que la relación había sido de tipo proporcional. De este modo, en el comienzo de la transición aeróbica-anaeróbica se puede observar una respuesta de tipo umbral a nivel electromiográfico, que se conoce *umbral de electromiografía* (UE), en los niveles de catecolaminas en plasma, *umbral de catecolaminas* (UC), y de la ventilación pulmonar, *umbral ventilatorio* (VT1).

Bibliografía

- Viana-Montaner BH, Gómez-Puerto JR, Centeno-Prada R, Beas-Jiménez JD, Melero-Romero D, Da Silva-Grigoletto ME. Comparación del VO_{2max} y del tiempo hasta el agotamiento en dos modalidades de ejercicio en triatletas. *Rev Andal Med Deporte*. 2009; 2(1): 7-11.
- Myers J, Prakash M, Froelicher V, Do D, Partington S, Atwood E. Exercise Capacity and Mortality among men referred for exercise testing. *N Engl J Med*. 2002;346(11):793-801.
- Jackson AS, Sui X, Herbert JR, Church TS, Blair SN. Role of life style and aging on the longitudinal change in cardiorespiratory fitness. *Arch Int Med*. 2009; 169(19):1781-7.
- Hollmann W. 42 years ago: development of the concepts of ventilatory and lactate threshold. *Sports Med*. 2001;31(5):315-20.
- Meyer T, Lucia A, Earnest CP, Kindermann W. A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters – theory and application. *Int J Sports Med*. 2005;26(1):38-48.
- Bosquet L, Léger L, Legros P. Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med*. 2002;32(11):675-700.
- Davis JA, Rozenek R, DeCicco DM, Carizzi MT, Pham PH. Comparison of three methods for detection of the lactate threshold. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2007;27:381-4.
- Myers J, Ashley E. Dangerous curves: a perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. *Chest*. 1997;111(3):787-95.
- Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 1979;42:5-34.
- Skinner JS, McLellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport*. 1980;51(1):234-48.
- Davis JA, Vodak P, Wilmore JH, Vodak J, Kurtz P. Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J Appl Physiol*. 1976;41:544-50.
- Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*. 1979;11(4):338-44.
- Weltman A, Snead D, Seip R, Schurrer R, Levine S, Rutt R, et al. Prediction of lactate threshold and fixed blood lactate concentrations from 3200-m running performance in male runners. *Int J Sports Med*. 1987;8(6):401-6.
- Zoladz J, Rademaker AC, Sargeant AJ. Non-linear relationship between O₂ uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol*. 1995;488:211-7.
- Hughson RL, Green HJ. Blood acid-base and lactate relationships studied by ramp work tests. *Med Sci Sports Exerc*. 1982;4(4):297-302.
- Bentley DJ, Newell J, Bishop D. Incremental Exercise Test Design and Analysis: Implications for Performance Diagnostics in Endurance Athletes. *Sports Med*. 2007;37(7): 575-86.
- LaFontaine TP, Londeree BR, Spath WK. The maximal steady state vs selected running events. *Med Sci Sport Exerc*. 1981;13:190-3.
- Hurley BF, Hagberg JM, Allen WK, Seals DR, Young JC, Cuddihee RW, et al. Effect of training on blood lactate level during submaximal exercise. *J Appl Physiol*. 1984;56(5): 1260-4.
- Worms F, Kozariszczuk G, Hunger KL. Untersuchungen zur herzschlagfrequenz im aerob-anaeroben ubergang bei der fahrradergometrie im mittleren und hoheren lebensalter. *Med Sport*. 1985;25:85-91.
- Sjodin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*. 1981;2(1):23-6.

21. Faude O, Kindermann W, Meyer T. Lactate threshold concepts. How valid are they? *Sports Med.* 2009;39(6):469-90.
22. Midgley AW, McNaughton LR, Jones AM. Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 2007;37(10):857-80.
23. Dickhuth HH, Yin L, Niess A, Röcker K, Mayer F, Heitkamp HC, et al. Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. *Int J Sports Med.* 1999;20(2):122-7.
24. Pardono E, Sotero RC, Hiyane W, Mota MR, Campbell CSG, Nakamura FY, et al. Maximal lactate steady-state prediction through quadratic modeling of selected stages of the lactate minimum test. *J Strength Cond Res.* 2008;22:1073-80.
25. Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2000; 32:70-84.
26. Celik, Kosar SN, Korkusuz F, Borkurt M. Reliability and validity of the modified Conconi test on Concept II rowing ergometers. *J Strength Cond Res.* 2005;19(4):871-7.
27. Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: physiology and training, part 1. *Sports Med.* 2005;35(4):285-312.
28. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: The physiology of champions. *J Physiol.* 2008;586:35-44.
29. Mezzaroba PV, Machado FA. Indirect Determination of Lactate Minimum Speed from a Single Maximal Performance in Young Swimmers. *J Sports Sci Med.* 2013;12:655-9.
30. Støren Ø, Rønnestad BR, Sunde A, Hansen J, Ellefsen S, Helgerud J. A time-saving method to assess power output at lactate threshold in well-trained and elite cyclists. *J Strength Cond Res.* 2014;28(3):622-9.
31. Lucía A, Hoyos J, Chicharro JL. Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 2001;31(5):325-37.
32. Londeree B. Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29(6):837-43.
33. Coyle EF, Martin WH, Ehsani AA, Hagberg JM, Bloomfield SA, Sinacore DR, et al. Blood lactate threshold in some well-trained ischemic heart disease patients. *J Appl Physiol.* 1983;54(1):18-23.
34. Bunc V, Heller J, Bojanovský I, Sprynarová S, Novak J. Determination of the individual anaerobic threshold with regard to the individual functional state using changes within the parameters of the acid-base equilibrium. *Cas Lek Cesk.* 1984;123(29):899-903.
35. Yoshida T, Chida M, Ichioka M, Suda Y. Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *Eur J Appl Physiol.* 1987;56:7-11.
36. Hambrecht RP, Niebauer J, Fiehn E, Marburger CT, Muth T, Offner B, et al. Effect of an acute beta-adrenergic blockade on the relationship between ventilatory and plasma lactate threshold. *Int J Sports Med.* 1995;16(4):219-24.
37. Burnley B, Jones AM. Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. *Eur J Sport Sci.* 2007;7(2):63-79.
38. Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol.* 1973;35(2):236-43.
39. Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN, Clearly MG. Effect of carotid body resection on ventilator and acid-base control during exercise. *J Appl Physiol.* 1975;39:354-8.
40. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 1986;60(6):2020-7.
41. Sue DY, Wasserman K, Moricca RB, Casaburi R. Metabolic acidosis during exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Use of the V-slope method for anaerobic threshold determination. *Chest.* 1988;94(5):931-8.
42. Wasserman K, McLroy MB. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am J Cardiol.* 1964;14:844-52.
43. Davis JA, Franc MH, Whipp BJ, Wasserman K. Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *J Appl Physiol.* 1979;46:1039-46.
44. Legaz A, Easton R. Changes in performance, skinfold thicknesses, and fat patterning after three years of intense athletic conditioning in high level runners. *Br J Sports Med.* 2005;39:851-5.
45. Hoogeveen AR. The effect of endurance training on the ventilatory response to exercise in elite cyclist. *Eur J Appl Physiol.* 2000;82:45-51.
46. Lucía A, Hoyos J, Pérez M, Chicharro JL. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1777-82.
47. Svedahl K, Macintosh BR. Anaerobic threshold: The concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol.* 2003;28(2):299-323.
48. von Duvillard SP, LeMura LM, Bacharach DW, Di Vico P. Determination of lactate threshold by respiratory gas exchange measures and blood lactate levels during incremental load work. *J Manipulative Physiol Ther.* 1993;16:312-8.
49. Goldstein DS. Plasma norepinephrine and sympathetic neural activity in clinical cardiology. *Am J Cardiol.* 1981;48:1147-54.
50. Mazzeo RS, Marshall P. Influence of plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise. *J Appl Physiol.* 1989;67:1319-22.
51. Weltman A, Wood CM, Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Alvarez J, et al. Catecholamine and blood lactate responses to incremental rowing and running exercise. *J Appl Physiol.* 1994;76:1144-9.
52. Schwarz L, Kindermann W. B-endorphin, adrenocorticotropin hormone, cortisol and catecholamines during aerobic and anaerobic exercise. *Eur J Appl Physiol.* 1990;61:165-71.
53. McMorris T, Sproule J, Draper S, Child R, Sexsmith JR, Forster CD, et al. The measurement of plasma catecholamine and lactate thresholds: A comparison of methods. *Eur J Appl Physiol.* 2000;82:262-7.
54. Urhausen A, Weiler B, Coen B, Kindermann W. Plasma catecholamines during endurance exercise of different intensities as related to the individual anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1994;69(1):16-20.
55. Febbraio MA, Lambert DL, Starkie RL, Proietto J, Hargreaves M. Effect of epinephrine on muscle glycogenolysis during exercise in trained men. *J Appl Physiol.* 1998;84:465-70.
56. Stout JR, Cramer JT, Mielke M, O'Kroy JA, Torok D, Zoeller RF. Effects of twenty eight days of beta-alanine and creatine monohydrate supplementation on the physical working capacity at neuromuscular fatigue threshold. *J Strength Cond Res.* 2006;20:928-31.
57. Zoeller RF, Stout JR, O'Kroy JA, Torok DJ, Mielke M. Effects of 28 days of beta-alanine and creatine monohydrate supplementation on aerobic power, ventilatory and lactate thresholds, and time to exhaustion. *Amino Acids.* 2007;33:505-10.
58. De Vries HA, Tichy MW, Houh TJ, Smyth KD, Ticky AM, Housh A. A method for estimating physical working capacity at the fatigue threshold (PWC). *Ergonomics.* 1987;30:195-204.
59. De Vries HA, Housh TJ, Johnson GO, Evans SA, Sharp GD, Housh DJ, et al. Factors affecting the estimation of physical working capacity at the fatigue threshold. *Ergonomics.* 1990; 33:25-33.
60. Kendall KL, Smith AE, Graef JL, Walter AA, Moon JR, Lockwood CM, et al. Validity of electromyographic fatigue threshold as a non-invasive method for tracking changes in ventilatory threshold in college-aged men. *J Strength Cond Res.* 2010;24(1):109-13.
61. Lucía A, Sánchez O, Carvajal A, Chicharro JL. Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *Br J Sports Med.* 1999;33:178-85.
62. Calderón FJ, Benito PJ, Peinado AB, Díaz V. Significado fisiológico de la transición aeróbica-anaeróbica. *Rev Int Med Cienc Act Fis Deporte.* 2008;8(32):321-37.
63. McClaren DP, Gibson H, Poarry-Billings M, Edwards RHT. A review of metabolic and physiological factors in fatigue. *Exerc Sport Sci Rev.* 1989;17:29-68.
64. Taylor AD, Bronks R, Bryant AL. The relationship between electromyography and work intensity revisited: A brief review with references to lactic acidosis and hyperammonia. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1997;37:387-98.
65. Candotti CT, Melo MO, La Torre M, Pasini M, Dutra LA, Oliveira JLN, et al. Comparing the lactate and EMG thresholds of recreational cyclists during incremental pedaling exercise. *Can J Physiol Pharmacol.* 2008; 86:272-8.
66. Kang SK, Kim J, Kwon M, Eom H. Objectivity and validity of EMG method in estimating anaerobic threshold. *Int J Sports Med.* 2014;35(9):737-42.
67. Chicharro JL, Legido JC, Alvarez J, Serratos L, Bandres F, Gamella C. Saliva electrolytes as a useful tool for anaerobic threshold determination. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1994;68(3):214-8.
68. Chicharro JL, Calvo F, Álvarez J, Vaquero AF, Bandrés F, Legido JC. Anaerobic threshold in children: Determination from saliva analysis in field tests. *Eur J Appl Physiol.* 1995; 70:541-4.
69. Chicharro JL, Lucía A, Pérez M, Vaquero AF, Urena R. Saliva composition and exercise. *Sports Med.* 1998;26(1):17-27.
70. Calvo F, Chicharro JL, Bandrés F, Lucía A, Pérez M, Alvarez J, et al. Anaerobic threshold determination with analysis of salivary amylase. *Can J Appl Physiol.* 1997;22(6):553-61.
71. De Sousa NMF, Magosso RF, Pereira GB, Souza MV, Vieira A, Marine DA, et al. Acute Cardiorespiratory and metabolic responses during resistance exercise in the lactate threshold intensity. *Int J Sports Med.* 2012;33(2):108-13.
72. Moreira SR, Arsa G, Oliveira HB, Lima LC, Campbell CS, Simoes HG. Methods to identify the lactate and glucose thresholds during resistance exercise for individuals with type 2 diabetes. *J Strength Cond Res.* 2008;22(4):1108-15.
73. Garnacho-Castaño MV, Domínguez R, Ruiz-Solano P, Maté-Muñoz JL. Acute physiological and mechanical responses during resistance exercise executed at the lactate threshold workload. *J Strength Cond Res.* 2015;Apr 3 [Epub ahead of print].
74. Garnacho-Castaño MV, Domínguez R, Maté-Muñoz JL. Understanding the meaning of the lactate threshold in resistance exercises. *Int J Sports Med.* 2015;36:371-7.
75. Maté-Muñoz JL, Domínguez R, Barba M, Monroy AJ, Ruiz-Solano P, Garnacho-Castaño MV. Cardiorespiratory and metabolic responses to loaded half squat corresponding to the lactate threshold. *J Sport Sci Med.* 2015;14:648-56.