

RESPUESTAS RESPIRATORIAS AL EJERCICIO.

6.1. VENTILACIÓN PULMONAR:

A) ANTES DEL INICIO DEL EJERCICIO se produce un **AUMENTO ANTICIPADO** (“ASCENSO ANTICIPATORIO”) de la ventilación pulmonar (similar al observado en la FC), principalmente en deportistas entrenados.

➤ **¿QUÉ EFECTOS PRODUCE LA HIPERVENTILACIÓN ANTES DE UNA INMERSIÓN?, ¿ES UNA ESTRATEGIA ADECUADA?:**

- **La hiperventilación voluntaria reduce la PCO_2 de la sangre arterial desde 40 mmHg hasta unos 15 mmHg, y con ello la concentración de H^+ (alcalosis).** Estos cambios metabólicos reducen drásticamente el impulso ventilatorio (“las ganas de respirar”). Sin embargo, la hiperventilación **no incrementa significativamente la PO_2 arterial.**

De este modo, si realizamos una prueba de **buceo** precedida de hiperventilación, **el O_2 contenido en la sangre puede llegar a niveles críticamente bajos mucho antes de que la acumulación de CO_2 y el \downarrow pH fuerce al nadador a subir a la superficie y respirar.** Estas pruebas pueden hacer que un buceador pierda la conciencia antes de experimentar el deseo de respirar.

B) DURANTE EL EJERCICIO FÍSICO:

➤ Mientras la ventilación minuto (V_E)¹ es de unos **6-7,5 l/min EN REPOSO** [($VT = 0,5$ l) x ($FR = 12-15$ respiraciones/min)], **DURANTE ESFUERZOS MÁXIMOS** ($V_{Emáx}$) se alcanzan los **100-120 l/min en personas sedentarias.**

- La Frecuencia Respiratoria máxima (**$FR_{máx}$**) alcanza valores de **35-45 respiraciones/min** en sedentarios y **60-70 respiraciones/min** en deportistas de elite.
- El Volumen Corriente máximo (**$VT_{máx}$**) es de unos **2-2,5 l**. El VT no suele exceder el **55-65% de la capacidad vital**, tanto en sujetos sedentarios como deportistas de alto rendimiento.

➤ **Tras comenzar el ejercicio físico (ligero, moderado o intenso), LA VENTILACIÓN PULMONAR SE INCREMENTA EN DOS FASES:**

¹ VENTILACIÓN MINUTO (V_E): Cantidad de aire espirado en un minuto.
 $V_E =$ Volumen corriente (VT) x Frecuencia respiratoria (FR).

FASE 1. Tras el inicio de la actividad se produce un **INCREMENTO RÁPIDO Y NOTABLE** en la profundidad y frecuencia de la respiración (30-50 s).

- **Origen mecánico:** Los centros respiratorios (tronco cerebral) reciben estímulos desde la corteza motora, los músculos activos y las articulaciones.

FASE 2. Posteriormente, el **INCREMENTO** de la ventilación se produce de forma **MÁS GRADUAL** (3-4 min).

- **Origen** → **Principalmente** \uparrow PCO_2 , \downarrow pH, \downarrow PO_2 , \uparrow K^+ , etc. (incremento del metabolismo).

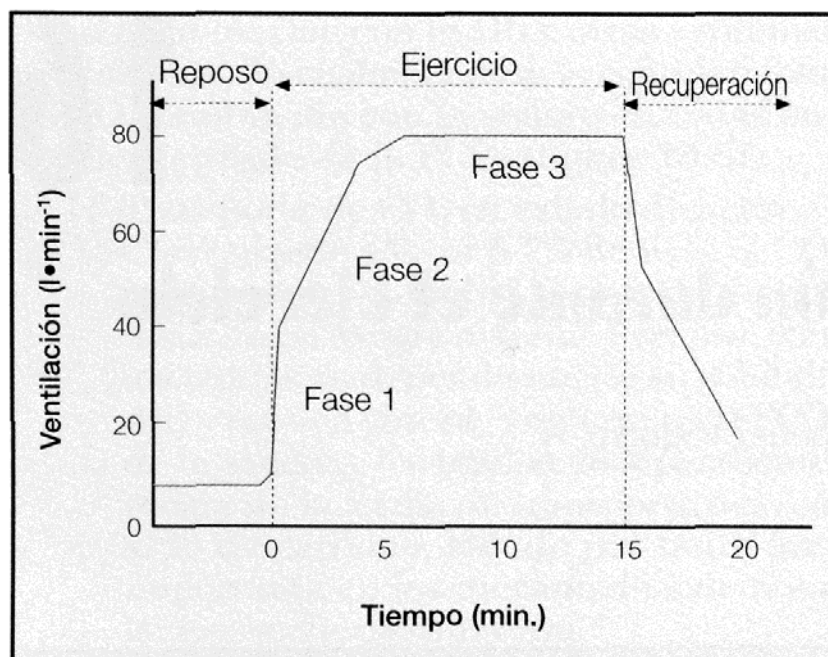


Figura 16.1. Representación gráfica de las fases en que se divide la respuesta ventilatoria al ejercicio de intensidad constante o de estado estable.

- Si el **ESFUERZO** es **SUBMÁXIMO Y MANTENIDO** la ventilación se estabiliza durante un periodo de tiempo → **Estado estacionario** ("steady state").
- **EJERCICIO INCREMENTAL DE INTENSIDAD LEVE O MODERADA:**
 - La ventilación aumenta de un modo proporcional al consumo de O_2 (VO_2) y la producción de CO_2 (VCO_2) → **Las relaciones V_E/VO_2 ("equivalente ventilatorio del oxígeno") y V_E/VCO_2 ("equivalente ventilatorio del dióxido de carbono") son lineales.**
 - El \uparrow de la ventilación se debe **principalmente al \uparrow del VT**, más que al incremento de la FR.

➤ **EJERCICIO INCREMENTAL DE ALTA INTENSIDAD HASTA EL AGOTAMIENTO:**

- En personas sedentarias, la relación V_E/VO_2 es **lineal hasta niveles de intensidad del 50-60% del $VO_{2\text{máx}}$** . A partir de dicho nivel la ventilación incrementa de forma desproporcionada, perdiéndose la linealidad de la relación → **“Umbral Ventilatorio”** (Wasserman, 1978), **“Umbral Aeróbico”** (Skinner-McLellan, 1980) o **“Umbral Ventilatorio 1”** (Orr, 1982).

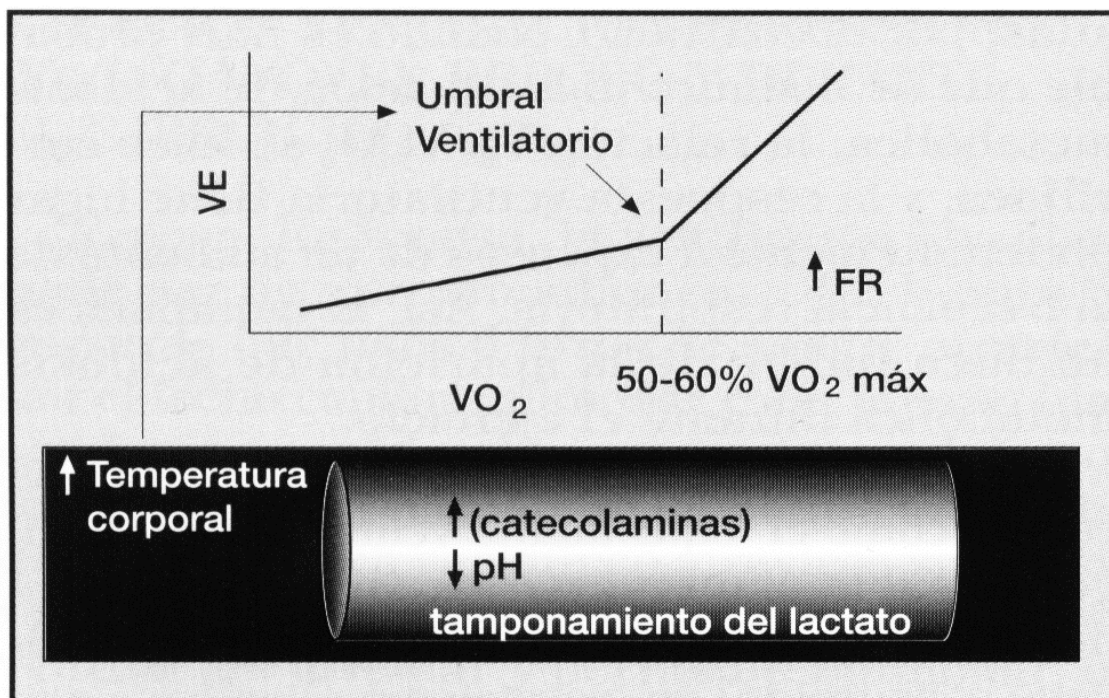
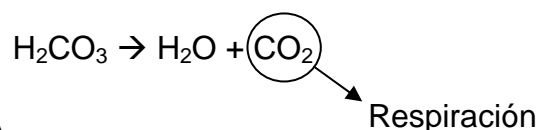
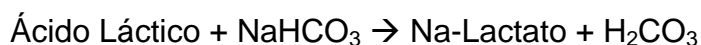


Figura 14.4. Respuesta de la ventilación a la realización de un ejercicio incremental (no estable).

Origen:

- TAMPONAMIENTO DEL ÁCIDO LÁCTICO por el bicarbonato sódico generado por la glucólisis anaeróbica:

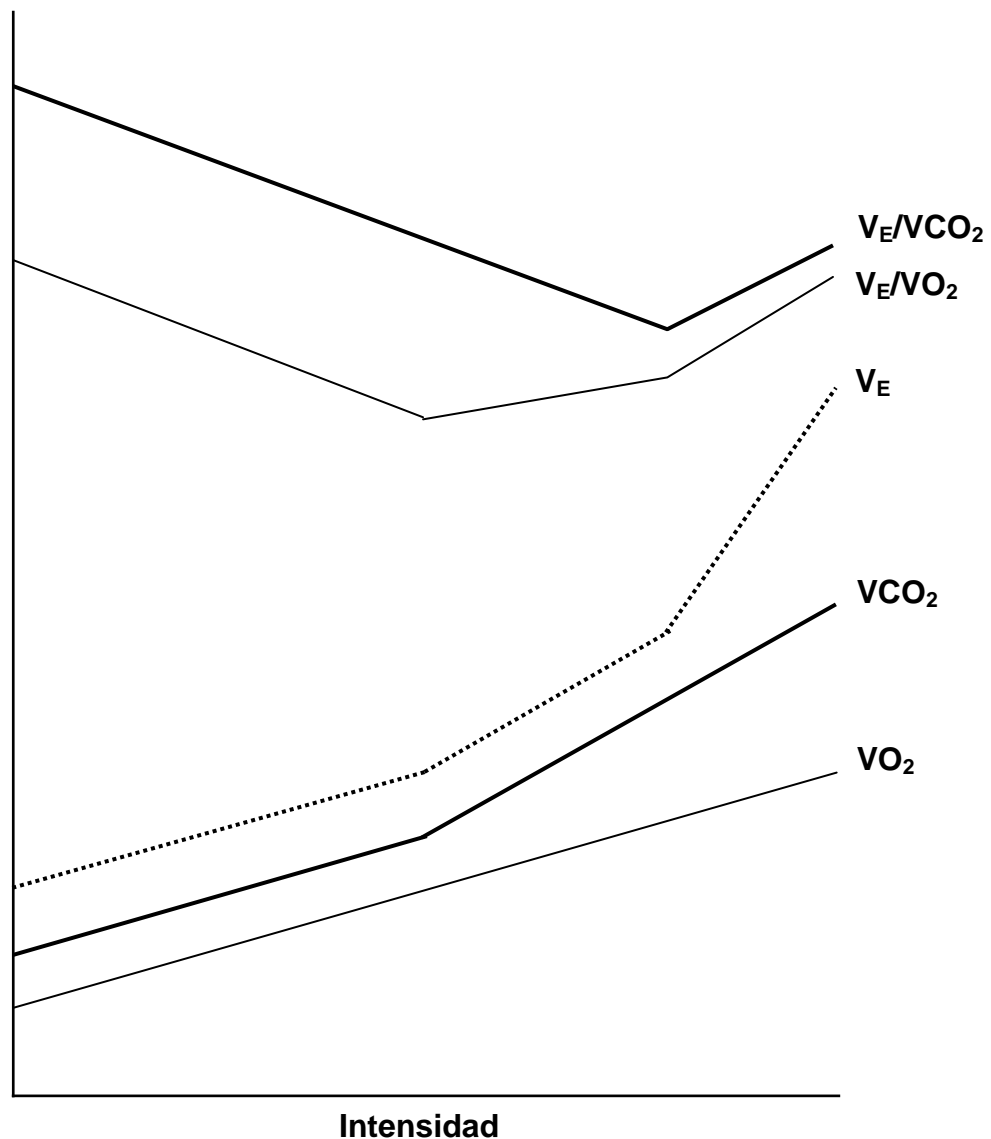


- ↑ TEMPERATURA.
- ↑ CATECOLAMINAS circulantes.
- OTROS.

- Cuando se supera el umbral ventilatorio o aeróbico, se pierde la relación entre la ventilación y el consumo de oxígeno, pero no entre la ventilación y la producción de CO₂. Progresivamente, **a mayores intensidades de trabajo, esta última relación también se pierde (aproximadamente al 80% VO₂máx) → “Umbral Anaeróbico”** (Skinner-McLellan, 1980) o “Umbral Ventilatorio 2” (Orr, 1982).

Este hecho se justifica por un **↑ ventilación debido a la acidosis metabólica.**

- En esfuerzos de alta intensidad el **↑ ventilación se debe principalmente al ↑ FR (taquipnea)**, más que al incremento del VT. Así, la taquipnea es un buen índice de acidosis metabólica durante el ejercicio físico.



C) TRAS EL EJERCICIO la ventilación pulmonar **vuelve a su estado normal a un ritmo rápido al principio (origen mecánico) y posteriormente de forma más lenta (origen metabólico).**

D) MÚSCULOS QUE PARTICIPAN EN LA VENTILACIÓN: (Kapandji, 1988)

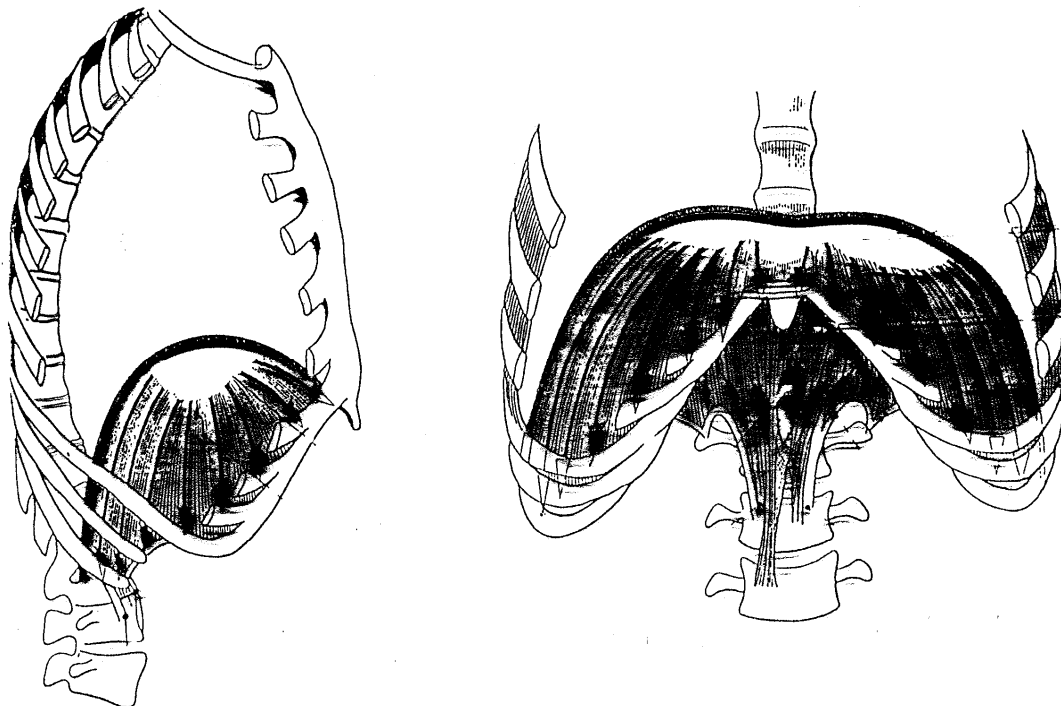
➤ **LA INSPIRACIÓN ES UN PROCESO ACTIVO** mediante el cual el diafragma y los músculos intercostales externos incrementan las dimensiones de la caja torácica → Esto reduce la presión en los pulmones y lleva el aire a los mismos.

➤ **MÚSCULOS DE LA INSPIRACIÓN (elevan las costillas y el esternón):**

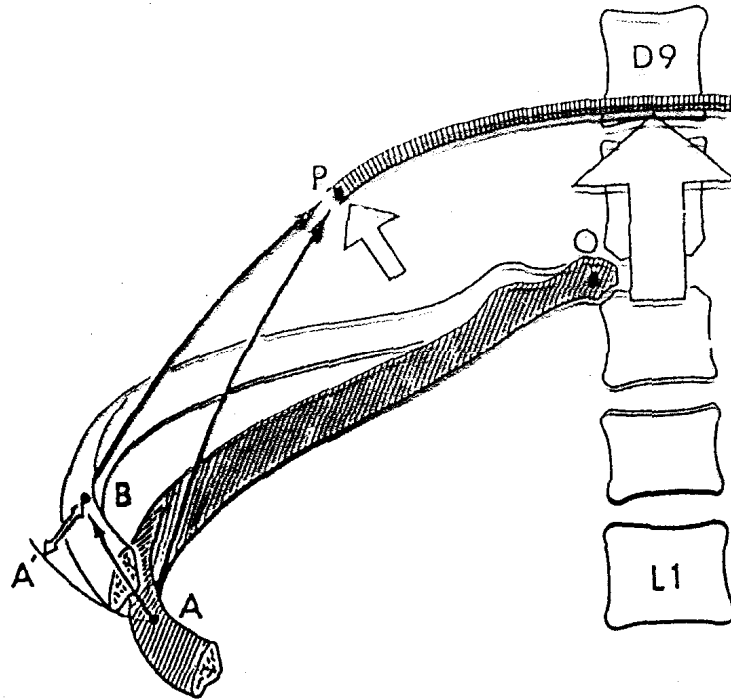
• **MÚSCULOS PRINCIPALES:**

- **El diafragma es un músculo esencial en la respiración**, ya que por sí solo ensancha los tres diámetros del volumen torácico:

▫ La contracción de las fibras musculares del diafragma hace descender el centro frénico → **EL DIÁMETRO VERTICAL DEL TÓRAX se ensancha.**



▫ Este descenso se ve limitado principalmente por la presencia de las vísceras abdominales, que son retenidas por la musculatura de la pared abdominal (sinergia). En ese momento el centro frénico se convierte en un punto fijo. Si prosigue la contracción de las fibras musculares del diafragma, se producirá una elevación de las costillas inferiores (ensanchando el **DIÁMETRO TRANSVERSAL DEL TÓRAX INFERIOR**) y el esternón (ensanchando el **DIÁMETRO ANTEROPOSTERIOR**).



- **Intercostales Externos:** Su contracción tira de los extremos de las costillas hacia arriba y hacia fuera, arrastrando también al esternón. De este modo, producen un **INCREMENTO DE LOS DIÁMETROS TRANSVERSAL Y ANTEROPOSTERIOR**.
- **Con el EJERCICIO FÍSICO se incrementa la participación del diafragma y los intercostales externos,** agonistas de la inspiración. **Además,** también participan otros músculos sinergistas (**inspiración forzada**):
 - **Con el raquis cervical fijo:**
 - Esternocleidomastoideo.
 - Escalenos: Anterior, Medio y Posterior.
 - **Con abducción del miembro superior:**
 - Pectoral Mayor y Menor.
 - Latísimo o Gran Dorsal.
 - **Con la escápula fija:**
 - Serrato Mayor.
 - **Además:**
 - Serrato Menor Superior.
 - Porción cervical del Iliocostocervical.

- **LA ESPIRACIÓN EN REPOSO ES UN FENÓMENO PURAMENTE PASIVO** de retorno del tórax sobre sí mismo tras la relajación muscular y gracias a la **energía elástica** que se almacena en los elementos elásticos del tórax y el pulmón (**RETRACCIÓN ELÁSTICA**). Esto incrementa la presión en los pulmones y fuerza al aire a salir de los mismos. En posición vertical la **gravedad** interviene en el descenso de las costillas y el esternón.
- Durante el **EJERCICIO FÍSICO** la espiración deja de ser un proceso **pasivo**, ya que participan diferentes músculos:
 - **MÚSCULOS PRINCIPALES → Agonistas:**
 - Intercostales Internos.
 - **MÚSCULOS ACCESORIOS → Sinergistas:**
 - Recto Mayor del Abdomen.
 - Oblicuo Externo del Abdomen.
 - Oblicuo Interno del Abdomen
 - Transverso del Abdomen.
 - Serrato Menor Inferior.
 - Porción lumbar del Iliocostocervical.
 - Longísimo del Dorso.
 - Cuadrado Lumbar.

6.2. DIFUSIÓN PULMONAR²:

- Durante el ejercicio físico se produce un **↑ DIFUSIÓN DE O₂** hacia la sangre y **DE CO₂** hacia los alveolos. Esto es **DEBIDO A**:
 - **↑ de los gradientes de presión** a través de la membrana respiratoria.
 - **↑ de la ventilación pulmonar.**
 - **↑ del flujo sanguíneo** a través de los pulmones (↑ perfusión pulmonar): Apertura de capilares pulmonares que estaban cerrados en reposo y mayor dilatación de los que ya estaban abiertos.

² Difusión pulmonar: Intercambio de gases entre los pulmones y la sangre.

➤ **COCIENTE O RELACIÓN VENTILACIÓN-PERFUSIÓN³ (V_E/Q ó V/Q).**

- **En reposo** el V/Q es de **0.8**.
- **En esfuerzos submáximos** el V/Q también es de **0.8**, ya que incrementan de igual modo la ventilación y el gasto cardiaco.
- En el ejercicio intenso se produce un **incremento desproporcionado de la ventilación (Hiperventilación)**, mientras que el aumento del Q es lineal con relación al esfuerzo realizado → **El V/Q puede aumentar por encima de 5.0**.

Para estas cargas de trabajo la ventilación es mayor que la exigida por la cantidad de O_2 que se está consumiendo. **La hiperventilación parece tener su origen en los grandes incrementos de CO_2 e H^+** que acompañan al ejercicio intenso (Wilmore y Costill 2000).



LA VENTILACIÓN PUEDE INCREMENTARSE EN MAYOR MEDIDA QUE LA FUNCIÓN CARDIOVASCULAR.

6.3. TRANSPORTE E INTERCAMBIO DE GASES:

- **↑ dif. a- vO_2** desde un valor en reposo de 4-5 ml por 100 ml de sangre hasta valores de 15-16 ml por 100 ml de sangre durante la realización de ejercicios intensos.

Este incremento **refleja una extracción incrementada de O_2** desde la sangre arterial por los músculos activos, reduciendo así el contenido de O_2 de la sangre venosa.

³ Perfusión: Paso de líquido por las arterias. Los pulmones son los únicos órganos del cuerpo humano que son atravesados por todo el volumen sanguíneo en 1 minuto, por lo tanto, en este caso la perfusión es expresada como el Q.

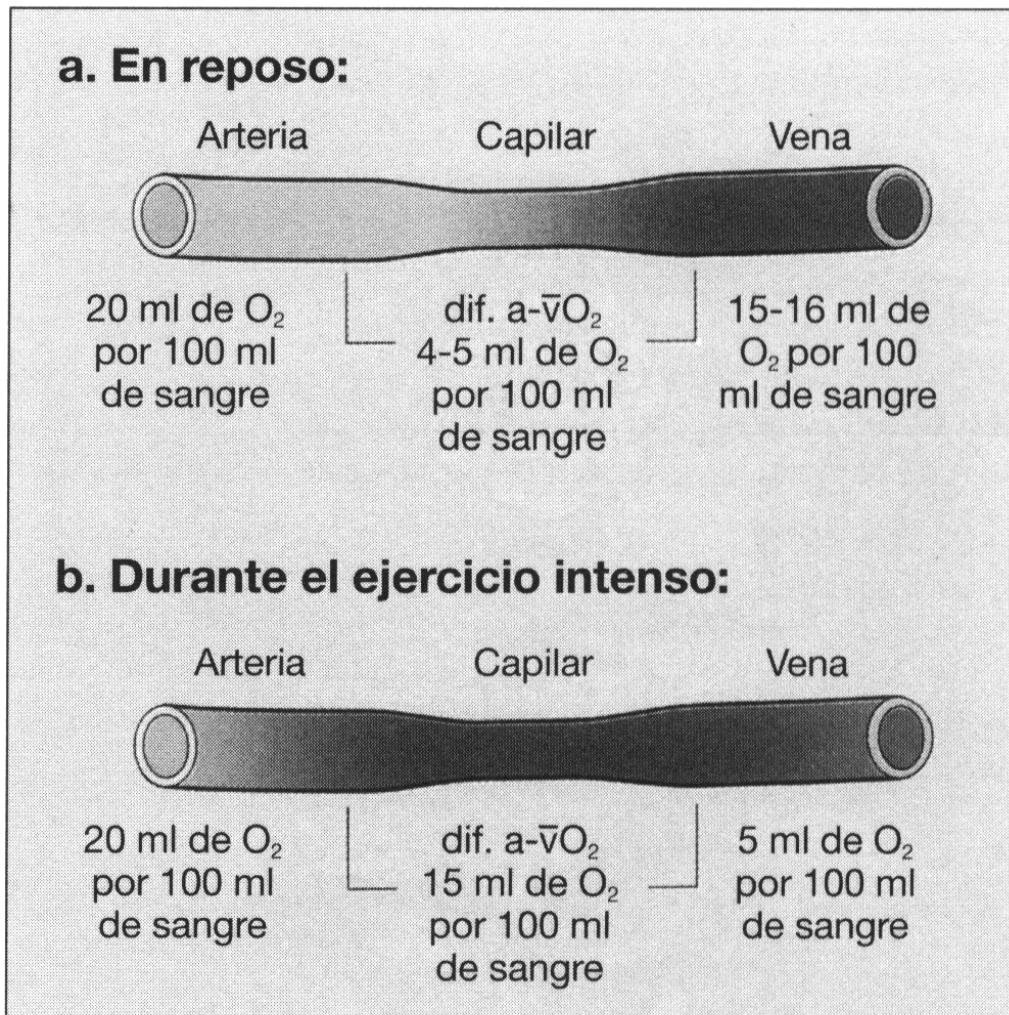


Figura 9.8 La diferencia de oxígeno arteriovenoso (dif. a- \bar{v} O₂) (a) en reposo y (b) durante el ejercicio intenso.

➤ **EL ORIGEN DE ESTE AUMENTO SE ENCUENTRA PRINCIPALMENTE EN:**

- ↑ **Intensidad del flujo de sangre** a los músculos
- ↑ **Temperatura**, ↑ **Concentración de H⁺ (↓ pH)** y ↑ **2,3-DPG⁴** en los músculos activos **DESPLAZAN HACIA LA DERECHA LA CURVA DE SATURACIÓN DE LA HEMOGLOBINA**, ya que disminuye la afinidad del O₂ y la hemoglobina, permitiendo que el O₂ se disocie con más facilidad para abastecer a estos músculos.

⁴ 2,3-DGP: 2,3 difosfoglicerato, compuesto que se produce en los hematíes durante el metabolismo anaeróbico.

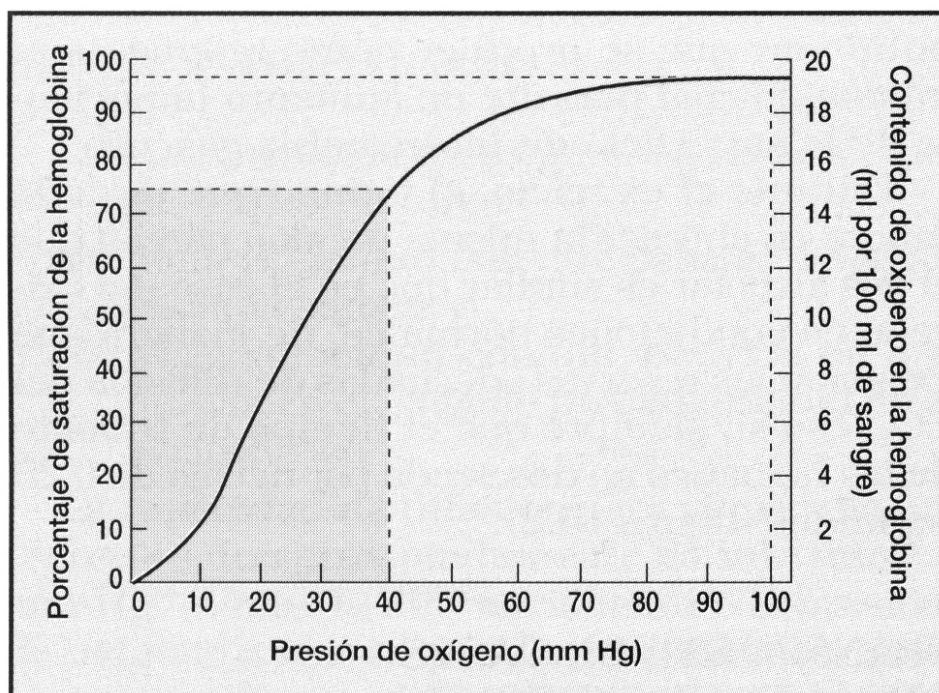


Figura 15.3. Porcentaje de saturación de la hemoglobina en relación con la presión de oxígeno. En el eje vertical de la derecha se muestra la cantidad de oxígeno contenida en la hemoglobina por 100 ml de sangre en condiciones normales. La línea horizontal superior indica el % de saturación del aire alveolar a nivel del mar.

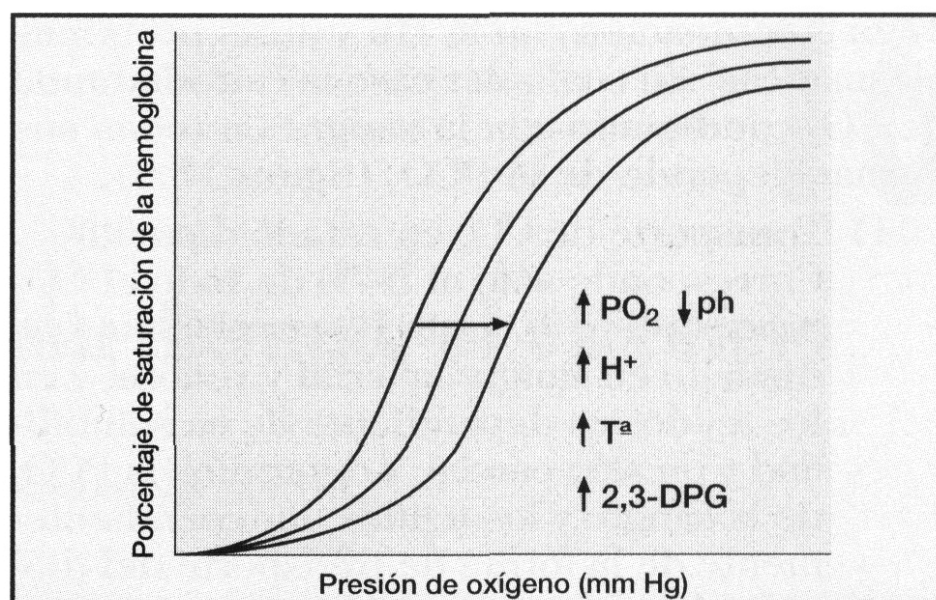


Figura 15.5. La desviación hacia la derecha significa que en el capilar tisular se descarga más O_2 para una determinada PO_2 , lo cual significa que en estas condiciones la cesión de O_2 desde la sangre a los tejidos se ve facilitada.

6.4. PUNTADA EN EL COSTADO (FLATO):

- La puntada en el costado o flato es un **DOLOR AGUDO EN LA PARED LATERAL DE LA CAJA TORÁCICA** que se presenta **AL PRINCIPIO DEL EJERCICIO** (generalmente carreras o natación) y suele desaparecer mientras éste prosigue.
 - Las personas muy entrenadas y deportistas profesionales no suelen tener flato.
 - A pesar del mito “el flato se produce por beber agua antes o durante el ejercicio”, éste puede aparecer a pesar de no ingerir líquidos.
- **NO SE CONOCE CON CERTEZA SU CAUSA**, se ha sugerido que podría estar mediado por la falta de O₂ (**HIPOXIA**) en el diafragma y los músculos intercostales debido a una **mala redistribución del flujo sanguíneo al inicio del ejercicio**. Otras teorías menos aceptadas: problema de origen mecánico, calambre en el diafragma, etc.
- Cuando se produce debemos **REDUCIR LA INTENSIDAD DEL ESFUERZO O PARAR** (no realizar esfuerzos intensos con flato).

ADAPTACIONES RESPIRATORIAS AL EJERCICIO AERÓBICO.

6.5. VOLÚMENES PULMONARES: (Principalmente Wilmore y Costill 2000)

- En general, **EL VOLUMEN Y LA CAPACIDAD DE LOS PULMONES permanecen ESENCIALMENTE INVARIABLES** después del entrenamiento de resistencia. **Únicamente SE PUEDE DESTACAR:**
 - La capacidad vital (CV)⁵ ↑ **levemente.**
 - El volumen residual (VR)⁶ ↓ **ligeramente.**
 - El volumen corriente máximo (VT_{máx}) ↑ **levemente.**

6.6. FRECUENCIA RESPIRATORIA: Tras el entrenamiento de resistencia:

- La FR suele ↓ **levemente en REPOSO.**
- La FR ↓ **levemente a intensidades SUBMÁXIMAS.**
- La FR_{máx} ↑ **EN GRAN MEDIDA**, alcanzando valores de **60-70 respiraciones/min** en deportistas de elite, frente a las 35-45 respiraciones/min de los sedentarios.

6.7. VENTILACIÓN PULMONAR:

- **EN REPOSO:** permanece **prácticamente invariable ($V_E = 6-7,5$ l/min) o se reduce levemente.**
- **ESFUERZOS SUBMÁXIMOS:** ↓ **Levemente.**
 - ↑ **Eficacia Respiratoria:** La V_E para un VO_2 submáximo determinado se reduce con el entrenamiento aeróbico. Así, durante ejercicios intensos el equivalente ventilatorio para el oxígeno desciende desde 25-30 en personas sedentarias hasta 20 en personas entrenadas en resistencia (↓ V_E/VO_2). Esta disminución se explica por múltiples causas: ↑ Elasticidad del tejido pulmonar, ↓ Resistencia al flujo aéreo, etc.

⁵ CAPACIDAD VITAL (CV): Mayor cantidad de aire que una persona puede movilizar dentro y fuera de los pulmones (adulto = 4500-5000 ml).

⁶ VOLUMEN RESIDUAL (VR): Cantidad de aire que permanece en el tracto respiratorio después de la espiración máxima (adulto = 1200 ml).

- **ESFUERZOS MÁXIMOS:** $\uparrow V_{E\text{máx}}$ sustancialmente desde 100-120 l/min hasta unos 150-180 l/min. Deportistas de resistencia de alto nivel pueden llegar a valores de 250 l/min.
 - Este aumento **se debe al mayor VT y principalmente a la mayor FR** durante esfuerzos máximos.

6.8. DIFUSIÓN PULMONAR:

- **EN REPOSO:** no se producen cambios (=).
- **ESFUERZOS SUBMÁXIMOS:** no se producen cambios (=).
- **ESFUERZOS MÁXIMOS:** \uparrow Debido a:
 - \uparrow Flujo de sangre a los pulmones (perfusión): $\uparrow Q$.
 - \uparrow Ventilación pulmonar.
 - \downarrow Resistencia a la difusión a través de las membranas respiratorias.

6.9. DIFERENCIA ARTERIOVENOSA DE OXÍGENO:

- La dif. a-vO₂ **AUMENTA CON EL ENTRENAMIENTO**, especialmente a niveles máximos de esfuerzo \rightarrow Refleja una mayor extracción de O₂ por los tejidos (\uparrow utilización del metabolismo aeróbico) y una más efectiva distribución de la sangre (\uparrow transporte).

EJERCICIO: ¿Suele limitar el rendimiento el funcionamiento del sistema respiratorio en pruebas de resistencia? Razona tu respuesta.

☞ **EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA RESPIRATORIO NO SUELE LIMITAR EL RENDIMIENTO FÍSICO EN PERSONAS SEDENTARIAS O INICIADAS:**

- El aparato respiratorio tiene una gran habilidad para llevar cantidades adecuadas de oxígeno al interior del cuerpo \rightarrow La ventilación puede incrementarse en mayor medida que la función cardiovascular: En esfuerzos máximos la relación ventilación perfusión (V_E/Q) puede superar valores de 5,0.

- Más del 15% del VO_2 máx durante la realización de ejercicios intensos puede tener lugar en los músculos respiratorios. Sin embargo, **los músculos respiratorios parecen estar mejor diseñados para evitar la fatiga** durante las actividades de larga duración que los músculos de las extremidades.

Teniendo en cuenta lo comentado en los párrafos anteriores, no es extraño que **LAS ADAPTACIONES** al entrenamiento **MÁS IMPORTANTES** observadas en el aparato respiratorio **SE MANIFIESTEN** con claridad durante la realización de **EJERCICIOS MÁXIMOS** cuando todos los sistemas están siendo forzados al máximo.

☞ **SIN EMBARGO**, se ha demostrado que los **CORREDORES DE FONDO MUY ENTRENADOS TIENEN LIMITACIONES RESPIRATORIAS EN SU RENDIMIENTO**. No pueden ventilar suficientemente sus pulmones para impedir una reducción de la PO_2 de la sangre arterial, lo que conlleva a una menor saturación de la hemoglobina.

Los sujetos no entrenados no parecen estar limitados por el aporte de oxígeno, sino por su utilización. Es decir, los sujetos entrenados podrían consumir más oxígeno si se lo ofrecieran a la mitocondria, mientras que **los sujetos sedentarios no disponen de la maquinaria mitocondrial necesaria como para que el aporte de oxígeno sea un factor limitante**.

☞ El aparato respiratorio **puede limitar también el rendimiento de personas con TRASTORNOS RESPIRATORIOS restrictivos u obstructivos**.

TEMA 6C. PARÁMETROS ERGOESPIROMÉTRICOS: RELACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL OXÍGENO Y METABOLISMO ENERGÉTICO.

- Tras estudiar los cambios producidos por el entrenamiento en los **SISTEMAS CARDIOVASCULAR Y RESPIRATORIO**, vamos a analizar cómo estos sistemas **SE INTEGRAN CON EL METABOLISMO DE LOS TEJIDOS ACTIVOS**. Para ello, nos centraremos en diversos parámetros ergoespirométricos:

- 1) **CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO.**
- 2) **UMBRAL ANAERÓBICO.**
- 3) **COCIENTE RESPIRATORIO.**
- 4) **EQUIVALENTE VENTILATORIO PARA EL OXÍGENO.**

6.10. EL CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO ($VO_{2m\acute{a}x}$):

- Ante un **aumento progresivo de la intensidad del esfuerzo** (demanda creciente de energía) nuestro cuerpo alcanza un **límite en su VO_2** , aun cuando la intensidad de nuestro esfuerzo continúa incrementándose. Este límite recibe el nombre de consumo máximo de oxígeno o **$VO_{2m\acute{a}x}$** : **Cantidad máxima de O_2 que el organismo puede absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo.**

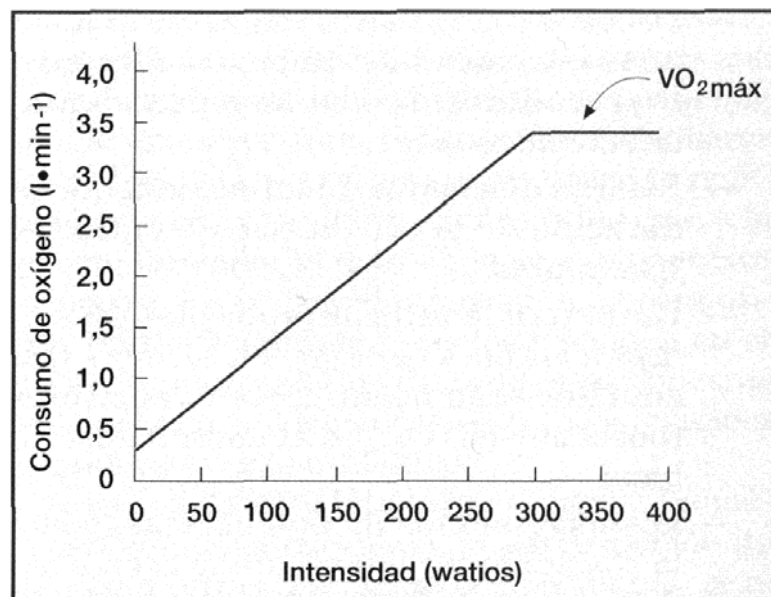


Figura 22.2. Comportamiento del consumo de oxígeno (VO_2) durante la realización de una prueba máxima en la que se alcanza el $VO_{2m\acute{a}x}$.

En actividades donde el deportista tiene que sostener su propio peso, el VO_2 máx se expresa generalmente como **ml/kg/min**. Sin embargo, en natación y ciclismo podría ser más adecuado expresarlo en **ml/min**. Los ml/min representan un valor absoluto (sin tener en cuenta el peso corporal), mientras que los ml/kg/min es un valor relativo.

Ejercicio: Ordena los siguientes deportistas en función de su VO_2 máx (de mayor a menor):

Deportista A: Pesa 90 kg y tiene un VO_2 máx de 4,5 l/min.

Deportista B: Pesa 60 kg y tiene un VO_2 máx de 3,9 l/min.

Deportista C: Pesa 70 kg y tiene un VO_2 máx de 4,2 l/min.

- El VO_2 máx es **MUY VARIABLE ENTRE INDIVIDUOS**. **Depende fundamentalmente de: (López Chicharro 2001)**
 - **La dotación genética:** La herencia puede condicionar **hasta el 70%** aproximadamente.
 - **La edad:** Gradualmente el VO_2 máx va aumentando con la edad y se alcanza el máximo entre los 18 y 25 años.
 - **El sexo:** Para cualquier edad, el VO_2 máx es mayor en los hombres.
 - **El peso, especialmente el peso magro:** A mayor masa muscular mayor VO_2 máx.
 - El grado de **entrenamiento o de condición física**. La condición aeróbica depende sólo un **20%** del entrenamiento.

- **IMPORTANCIA:** Constituye una **excelente valoración del estado del sistema de transporte de O_2** (López Chicharro 2001). Asimismo, representa la **medición de la capacidad o potencia aeróbica** de los deportistas (Bowers y Fox 1997), si bien un buen rendimiento en pruebas de resistencia supone algo más que un VO_2 máx elevado.

➤ **MEDICIÓN DEL VO_2 máx:** Es un parámetro ergoespirométrico **muy reproducible (fiable)**, pero para ello la metodología utilizada debe ser muy cuidadosa.

- Para alcanzar el VO_2 máx **se debe realizar un esfuerzo máximo**, lo cual depende de la **voluntad** del deportista y del **estado de forma** de la musculatura que realiza directamente el ejercicio.

En general, este último factor (**el nivel de condición física**) **suele limitar el esfuerzo del participante**, por lo que habitualmente la prueba se interrumpe bruscamente, no alcanzándose el VO_2 máx sino el **VO_2 pico** → **Punto de interrupción brusca en el ascenso gradual de la curva de VO_2 durante una prueba de esfuerzo de intensidad incremental.**

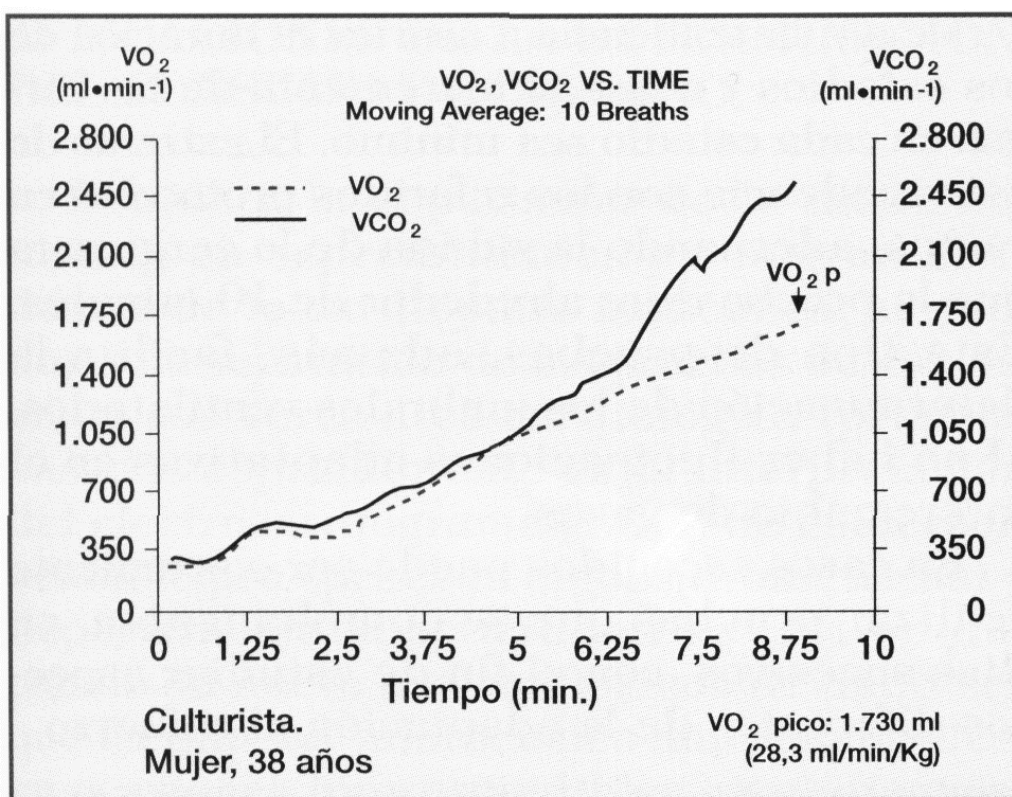


Figura 23.6. Curvas de VO_2 y VCO_2 respecto al tiempo de un caso en que el ascenso de VO_2 se interrumpe sin llegar a mostrar morfología en meseta, lo que se conoce como VO_{2pico} .

- El VO_{2pico} se produce **principalmente en sujetos no entrenados y en cardiopatas.**
- Desde un punto de vista práctico, **cuanto más se separe el VO_{2pico} del umbral ventilatorio**, mayor anaerobiosis se produce y **mayor parecido** habrá con el VO_2 máx real.

➤ **ADAPTACIONES DEL VO₂ AL ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AERÓBICA:**

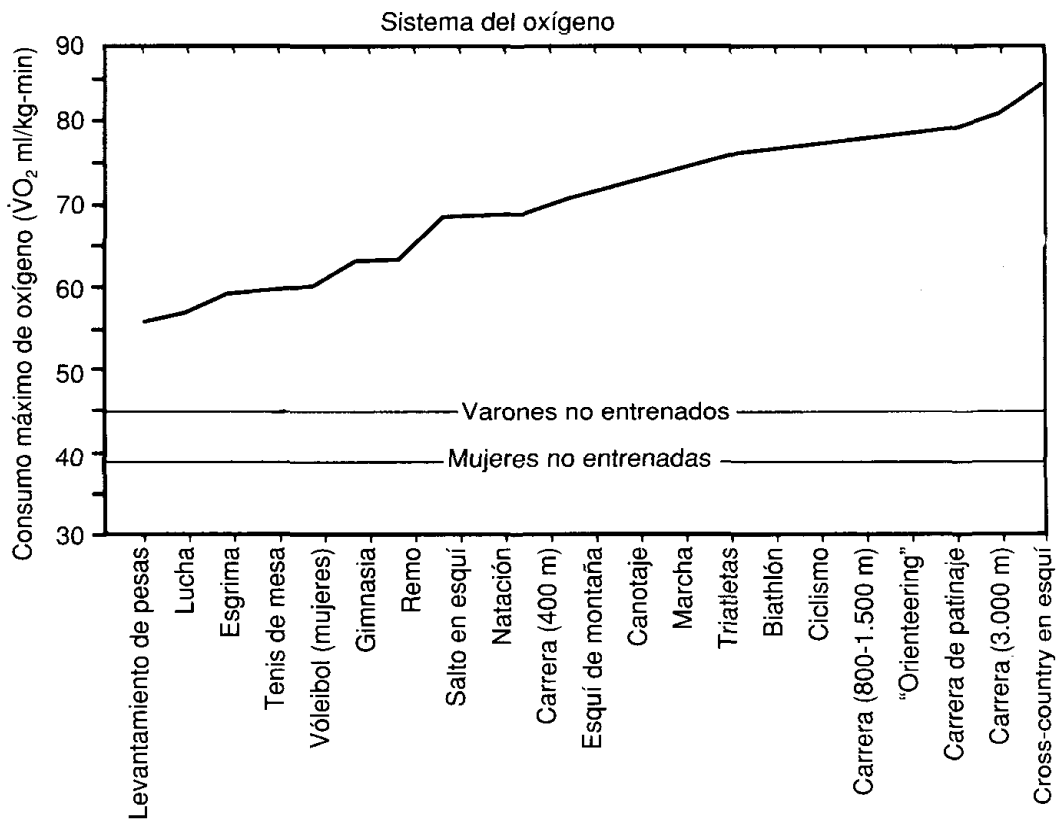
- **El VO₂ EN REPOSO no varía** (3,5 ml/kg/min) **o aumenta ligeramente** (debido a un ritmo metabólico levemente aumentado).
- **A NIVELES SUBMÁXIMOS DE EJERCICIO, el VO₂ no cambia o se reduce levemente** (puede ser el resultado de un incremento de la eficacia metabólica y/o sobre todo mecánica).
- **El VO₂máx aumenta sustancialmente** en respuesta al entrenamiento de resistencia.

Sedentarios (según López Chicharro 2001):

- MUJERES: 30-40 ml/kg/min.
- HOMBRES: 35-45 ml/kg/min.

Deportistas de resistencia de nivel mundial (Zintl 1991):

- MUJERES: 60-70 ml/kg/min
- HOMBRES: 80-90 ml/kg/min



Bowers y Fox, 1997

En varones de edad y talla media, **sedentarios antes del entrenamiento** y que han entrenado al 75% de su capacidad, tres veces por semana, 30 min al día, durante 6 meses, se han registrado **incrementos del VO₂máx de entre el 15 y el 20%**.

Nivel de acondicionamiento y VO₂máx:

- CUANTO MÁS ALTO es el ESTADO INICIAL del acondicionamiento, MENOR SERÁ LA MEJORA RELATIVA para el mismo programa de entrenamiento.
- EL VO₂máx SE MODIFICA MUY POCO A PARTIR DE LAS 6 SEMANAS DE ENTRENAMIENTO REGULAR. Llegado a este punto se deberían REALIZAR MODIFICACIONES en el programa de entrenamiento para asegurar una continuidad en el incremento del VO₂máx.
- Cada deportista tiene un NIVEL FINITO DE VO₂máx que puede alcanzarse.

Teorías sobre el origen del incremento del VO₂máx:

- TEORÍA DE LA UTILIZACIÓN: Aumento del tamaño y número de mitocondrias → Aumento de la cantidad de enzimas oxidativas.
- TEORÍA DE LA PRESENTACIÓN: Aumento del volumen de sangre y del Q (aumento del VS), mejor perfusión de los músculos activos (aumento de flujo de sangre hacia los músculos e incremento de la capilarización), etc.

Ante esta controversia, nosotros consideramos que en la práctica deportiva es imposible separar el factor metabólico del cardiocirculatorio-pulmonar (**posición ecléctica**).

6.11. EL UMBRAL ANAERÓBICO:

A) CONCEPTO (López Chicharro):

- **WASSERMAN (1967):** “Intensidad de ejercicio o de trabajo físico por encima de la cual empieza a aumentar de forma progresiva la concentración de lactato en sangre, a la vez que la ventilación se intensifica también de una manera desproporcionada con respecto al oxígeno consumido”.
- El umbral anaeróbico **se expresa generalmente en términos del %VO₂máx** en el que tiene lugar.

- **POSTERIORMENTE**, muchos han sido los autores que han propuesto diferentes términos y expresiones en torno al concepto de umbral anaeróbico **BASÁNDOSE EN LA METODOLOGÍA DE DETERMINACIÓN DEL MISMO:**

- El punto en el cual la concentración de lactato comienza a elevarse por encima de los valores de reposo se ha definido también como **umbral láctico o umbral del lactato**.
- El punto en el cual la ventilación se intensifica de forma desproporcionada con respecto al oxígeno consumido ha sido definido como **umbral ventilatorio**.

En la actualidad existe **controversia acerca de la relación real entre estos dos umbrales**, encontrándonos en la literatura trabajos que demuestran tanto la independencia de estos dos fenómenos como estudios que demuestran evidentes nexos de unión entre estos dos umbrales.

B) BASES TEÓRICAS DEL UMBRAL ANAERÓBICO (López Chicharro 2001):

- El **ÁCIDO LÁCTICO** es un ácido relativamente fuerte (pH = 3,9) lo que hace que se disocie en el medio interno. Este ácido disociado (H⁺) es tamponado fundamentalmente por el **SISTEMA BICARBONATO Y LA RESPIRACIÓN:**

- Ácido Láctico + Bicarbonato sódico ⇌ Lactato sódico + ácido carbónico.



- La **anhidrasa carbónica** cataliza la reacción $H_2CO_3 \Leftrightarrow CO_2 + H_2O$, de tal forma que el CO₂ se forma rápidamente.
 - La anhidrasa carbónica se localiza principalmente en la **SUPERFICIE ENDOTELIAL DE LOS VASOS MUSCULARES**. También en el interior de las células musculares (de forma mucho menos activa).

- El **EXCESO DE CO₂ producido durante el tamponamiento del LA** debe ser eliminado al exterior (junto al CO₂ formado como consecuencia del metabolismo aeróbico) mediante el **↑ de la ventilación**.
- Si la **CAPACIDAD TAMPÓN** del organismo se ve **SUPERADA** por la producción de LA durante el ejercicio se produce un **↓ DEL pH SANGUÍNEO → ↑ DESPROPORCIONADO DE LA VENTILACIÓN**.

C) TERMINOLOGÍA Y DETERMINACIÓN DEL UMBRAL ANAERÓBICO (López Chicharro):

- En la tabla siguiente (adaptada de López Chicharro y Legido Arce, 1991) se muestra la **NOMENCLATURA MÁS RELEVANTE CON RELACIÓN AL UMBRAL ANAERÓBICO**. La existencia de esta gran gama de términos relacionados con el umbral anaeróbico tiene su **ORIGEN EN LOS DIFERENTES MÉTODOS EXISTENTES PARA SU DETERMINACIÓN**.

NOMENCLATURA REFERIDA AL UMBRAL ANAERÓBICO Y CONCENTRACIÓN APROXIMADA DE LACTATO EN SANGRE			
2 mmol/l	2-4 mmol/l	4 mmol/l	Autor
Punto de óptima eficiencia respiratoria			Hollmann, 1959
Umbral anaeróbico			Wasserman, 1964
Umbral aeróbico	Zona de transición aeróbica-anaeróbica	Umbral anaeróbico	Skinner-McLellan, 1980
OPLA			Farrel, 1979
Umbral ventilatorio 1		Umbral ventilatorio 2	Orr, 1982
Transición aeróbica-anaeróbica			Pessenhofer, 1981
		Umbral aeróbico-anaeróbico	Mader, 1976
		IAT	Keul, 1979
		OBLA	Sjodin y Jacobs, 1981
		Umbral anaeróbico individual	Stegman, 1981
Umbral aeróbico		Umbral anaeróbico individual	Kindermann 1979
Nivel metabólico crítico			Owles, 1930
Máximo estado estable			Londeree, 1975



Umbral Aeróbico (2 mmol/l): Límite de la vía puramente aeróbica. Superado este umbral comenzará a acumularse el lactato y los sistemas buffer incrementarán la producción de CO₂ y la ventilación.

Zona de transición aeróbica-anaeróbica (2-4 mmol/l): Se produce un pequeño aumento en la concentración de lactato en sangre, aunque existe cierto equilibrio entre su producción y su metabolización. Los sistemas buffer amortiguan la caída del pH (↑ V_E y ↑ VCO₂)

Umbral anaeróbico (4 mmol/l): Es el punto a partir del cual la eliminación de lactato ya no va al paso de su producción, lo que supone un aumento abrupto en la concentración de lactato, y por tanto, la caída del pH → ↑ V_E.

- El **umbral láctico**, el **OPLA** (“Onset of Plasma Lactate Accumulation” → comienzo del acúmulo de lactato en plasma), y el umbral ventilatorio 1 (**VT₁**) ocurren a una intensidad de trabajo similar, de tal forma que el consumo de oxígeno es muy parecido y representa aproximadamente del **55% al 60% del VO₂máx** del sujeto y coincide con el término **UMBRAL AERÓBICO** empleado por otros autores.
- El **OBLA** (“Onset of Blood Lactate Accumulation” → Comienzo del acúmulo de lactato en sangre) y el umbral ventilatorio 2 (**VT₂**) aparecen al mismo porcentaje de VO₂, que suele ser del **75%-85% del VO₂máx**. Por último, el umbral anaeróbico individual (**IAT**) aparece a un **VO₂ algo inferior** al que aparece el VT₂ → **UMBRAL ANAERÓBICO**.

➤ **MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL UMBRAL:**

- **No invasivos o incruentos:**
 - Método de los equivalentes ventilatorios.

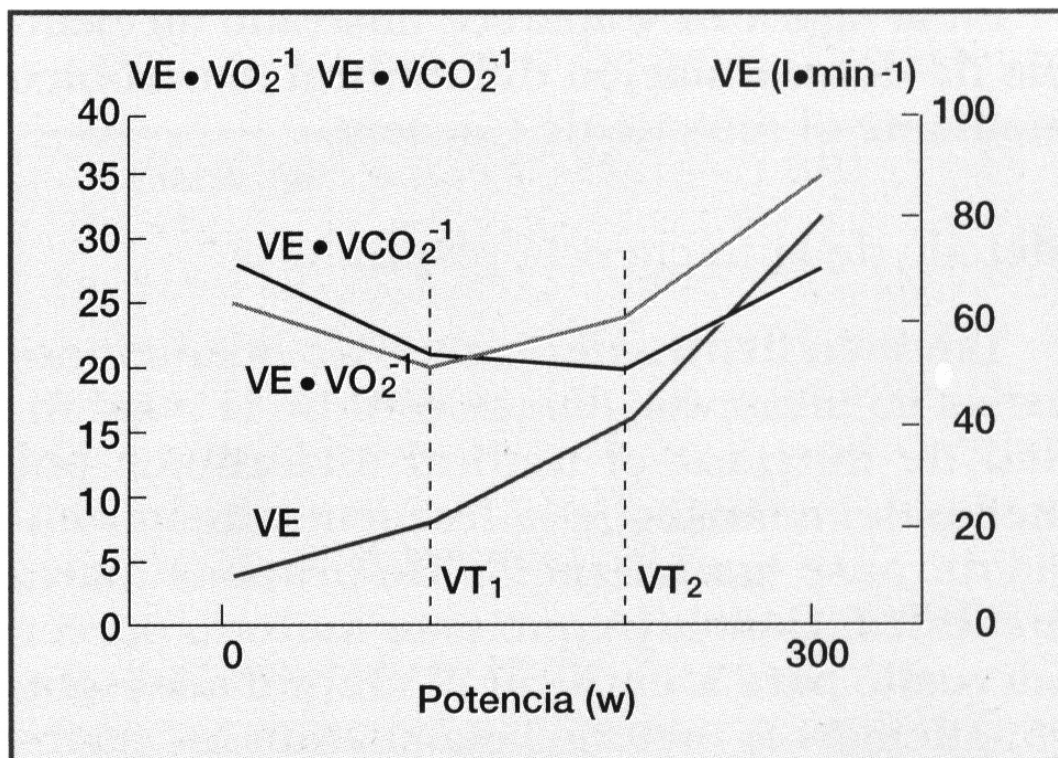


Figura 24.2. Representación esquemática del umbral ventilatorio 1 (**VT₁**) y 2 (**VT₂**) mediante los equivalentes ventilatorios.

- Método de la V-slope.

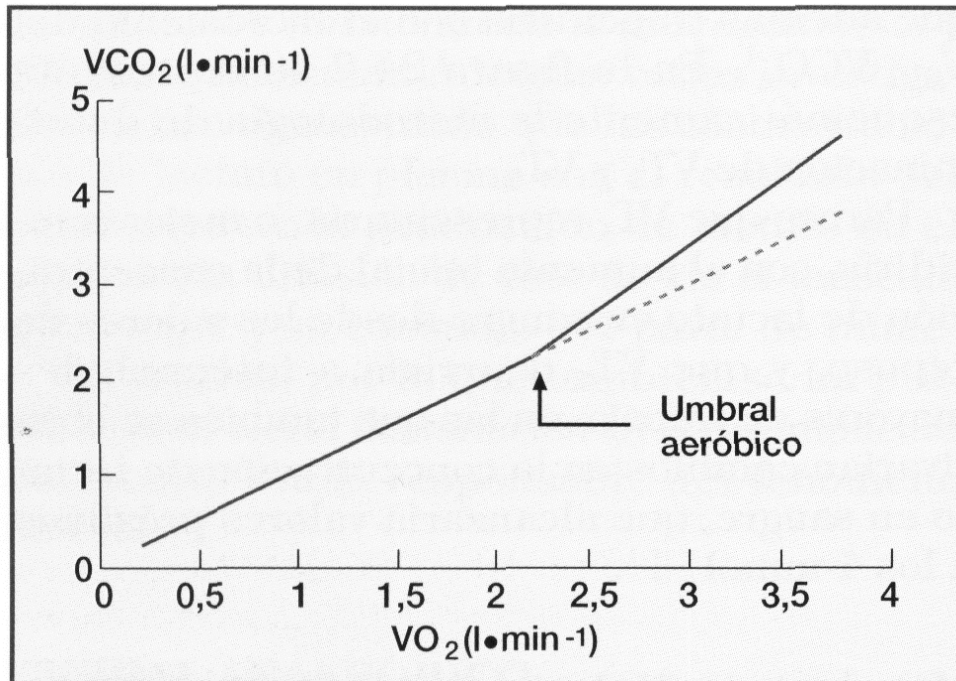
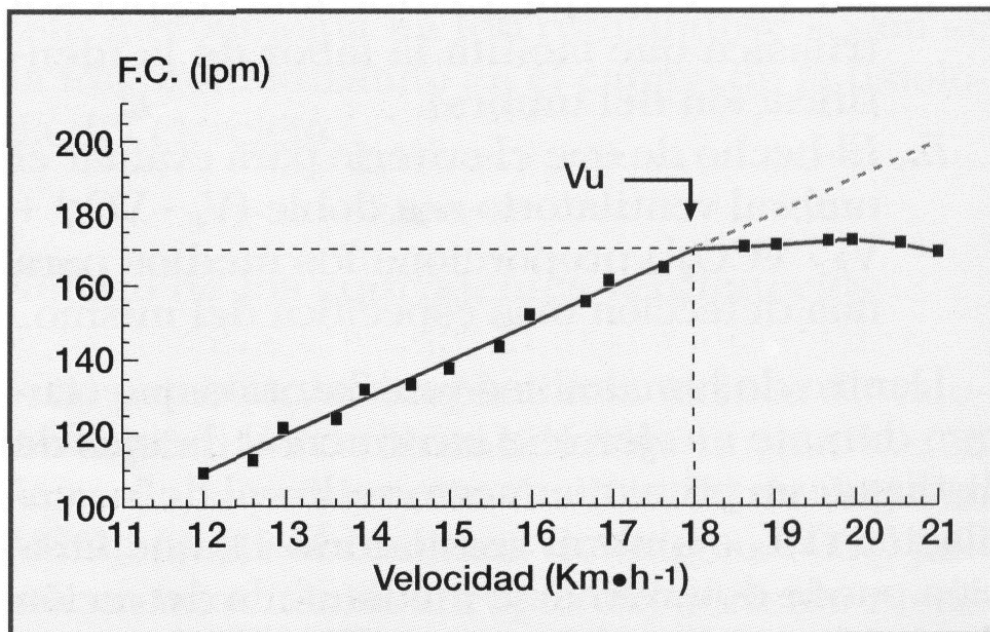


Figura 24.3. Relación VO_2 - VCO_2 durante la realización de un ejercicio incremental. Método de la «V-slope» para la determinación del umbral aeróbico.

- Método de Conconi.



V_u = velocidad correspondiente al umbral

Figura 24.4. Determinación del umbral anaeróbico según el método de Conconi.

- Método de la frecuencia respiratoria.
- Método electromiográfico.
- Umbral de saliva.

- **Invasivos o cruentos:**

- Métodos del análisis del lactato: Umbral láctico, OBLA, OPLA, IAT, etc.

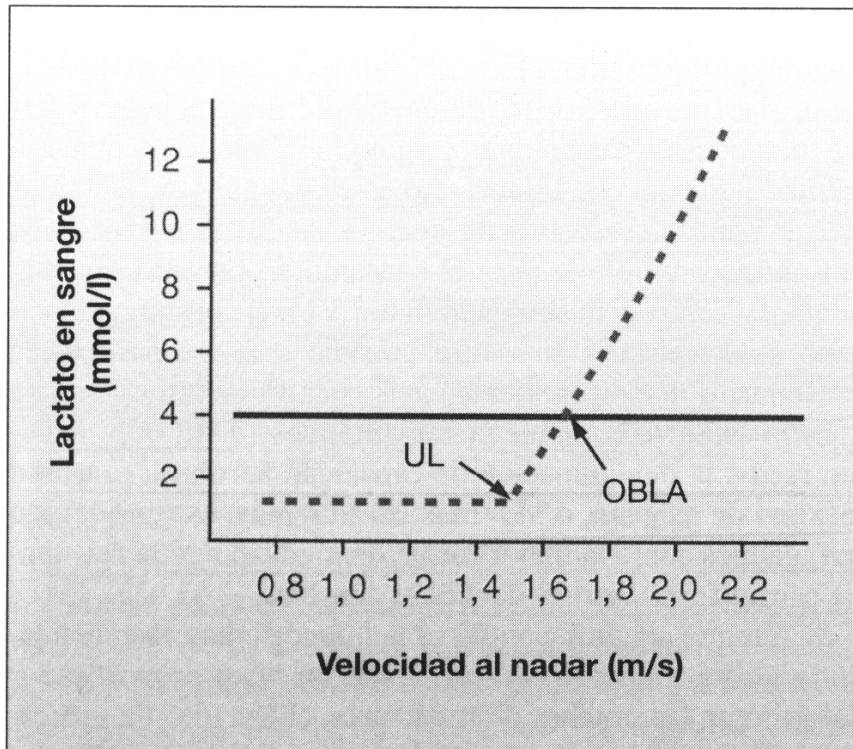


Figura 5.13 Relación entre la intensidad del ejercicio (velocidad al nadar) y la acumulación de lactato en sangre.

- Umbral de catecolaminas.

D) APLICACIONES DEL UMBRAL ANAERÓBICO EN FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO (López Chicharro 2001):

D1. CARACTERIZAR ATLETAS DE RESISTENCIA:

- Después de un programa de entrenamiento de resistencia aeróbica de varios meses de duración se puede producir un **estancamiento en los valores del VO_2 máx**, y sin embargo la **capacidad de resistencia puede seguir aumentando** → INCREMENTO DEL UMBRAL ANAERÓBICO.

Un alto umbral anaeróbico **proporciona al deportista la capacidad de realizar un esfuerzo sostenido de alta intensidad, sin que intervengan de forma excesiva los procesos anaeróbicos**, esto es fundamental para **reducir la fatiga** en cualquier esfuerzo de media y larga duración.

Individuos **sedentarios** el umbral ocurre al **50-60% VO₂máx**, mientras que en atletas de **resistencia** entrenados, ocurre **entre el 80 y el 90% del VO₂máx**.

- **Según Kindermann y col.:** (datos de referencia)
 - **UMBRAL AERÓBICO:**
 - No entrenados:* 45-50% VO₂máx (FC: 125-130).
 - Entrenados:* 60-65% VO₂máx (FC: 150-160).
 - **UMBRAL ANAERÓBICO:**
 - No entrenados:* 50-70% VO₂máx (FC: 140-150).
 - Entrenados Regularmente:* 70-80% VO₂máx (FC: 170-175).
 - Altamente entrenados:* 85-90% VO₂máx (FC: 180-190).
- **El incremento del Umbral Anaeróbico parece deberse a varios factores:**
 - ↑ MASA MITOCONDRIAL y ↑ ENZIMAS OXIDATIVAS en los músculos esqueléticos.
 - CAMBIO EN EL SUSTRATO METABÓLICO como consecuencia del entrenamiento: ↑ Utilización de los ácidos grasos y ↓ Utilización de glucosa.
 - ↑ UTILIZACIÓN DEL ÁCIDO LÁCTICO COMO FUENTE ENERGÉTICA durante el ejercicio submáximo.
 - Además, se produce un CAMBIO EN EL TIPO DE LACTATO-DESHIDROGENASA MUSCULAR (LDH) hacia la forma cardíaca (H4), lo que tiene como consecuencia una ↓ capacidad de formación de LA.

D2. EVALUAR LOS EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA mediante la observación de la evolución de los valores del umbral, **acercándose o alejándose de su VO₂máx**.

- Algunos trabajos realizados recientemente nos hablan de la **imposibilidad de evaluar los efectos del entrenamiento**,

únicamente con los datos referidos al VO₂máx. Otro parámetro determinante de la capacidad de resistencia de un deportista es su umbral anaeróbico.

- ↑ Umbral anaeróbico → ↑ Capacidad de resistencia.
 - ↓ Umbral anaeróbico → ↓ Capacidad de resistencia.
- El umbral anaeróbico **puede mejorar** con el entrenamiento **hasta un 50-70%**.

ATLETA	PRUEBA	VO ₂ máx	FC a VO ₂ máx	U.ANA	FC a U.ANA
Serrano	Marath.	80,0 ml/kg/min	183	94,3 %	180
M.T. Zúñiga	1.500	64,3 ml/kg/min	197	89,3 %	176
A. Prieto	10.000	85,9 ml/kg/min	193	88,8 %	189
A. Rodríguez	3.000	66,5 ml/kg/min	200	85,1 %	177
T. de Teresa	800	65,4 ml/kg/min	182	82,0 %	160
A. Antón	10.000	76,9 ml/kg/min	203	81,9 %	159

Fuente: García Manso y col. 1996.

D3. PRESCRIPCIÓN DE EJERCICIOS, controlando más científicamente el entrenamiento deportivo.

- Un parámetro que teóricamente **nos marca la zona a partir de la cual un ejercicio se torna fundamentalmente anaeróbico**, tiene una **gran utilidad** en cuanto a su aplicación en el campo del entrenamiento deportivo.
- **Metodología: Se determinan** mediante un test incremental en tapiz rodante (prueba de esfuerzo), y análisis de los gases espirados, los puntos correspondientes a los **distintos umbrales, relacionándolos con la frecuencia cardíaca alcanzada. A partir de ahí se planifican las cargas de entrenamiento.**

6.12. EL COCIENTE RESPIRATORIO:

- La relación de intercambio respiratorio (**RER, CR, R o RQ**) es la **proporción de CO₂ liberado en relación con el O₂ consumido** durante el metabolismo energético. **Refleja el tipo de sustratos que se están usando** como fuente de energía.
- **ADAPTACIONES AL ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AERÓBICA:**
 - **A INTENSIDADES DE ESFUERZO SUBMÁXIMAS** se produce un

↓ **CR** (mayor utilización de ácidos grasos libres en lugar de hidratos de carbono). **Debido a:**

- ↑ **Movilización de las grasas:** ↑ Capilarización, ↑ Lipasas, ↑ Carnitín-translocasa (entrada de ácidos grasos en la matriz mitocondrial).
- ↑ **Depósitos de triglicéridos** en los músculos.
- ↑ **Enzimas** implicadas en la **oxidación de las grasas**.

➤ **ADAPTACIONES AL ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA ANAERÓBICA:**

- **A NIVELES MÁXIMOS DE ESFUERZO se produce un ↑ CR.** Es el resultado de la capacidad para rendir a niveles máximos durante períodos más largos de tiempo de lo que era posible antes del entrenamiento. Refleja una sostenida hiperventilación con una gran cantidad de CO₂ liberada.

6.13. EQUIVALENTE VENTILATORIO PARA EL OXÍGENO:

- El V_E/VO_2 expresa el **GRADO DE EFICACIA DE LA VENTILACIÓN PULMONAR**. Cuanto menor es su valor, menor cantidad de aire es necesario ventilar para captar una unidad de oxígeno, luego la ventilación pulmonar será más eficaz o económica.
- Durante la realización de esfuerzos submáximos de intensidad incremental, el equivalente ventilatorio desciende paulatinamente hasta alcanzar un **VALOR MÍNIMO (a un nivel de intensidad que se corresponde con el umbral aeróbico)**, estando este valor alcanzado en relación con el nivel de entrenamiento del sujeto. Los sujetos mejor entrenados físicamente son los que presentan **VALORES MÍNIMOS MÁS BAJOS** del equivalente ventilatorio, queriendo esto decir que son los sujetos que presentan un sistema de **VENTILACIÓN MÁS EFICAZ**.

6.14. EL ÉXITO EN LAS ACTIVIDADES DE RESISTENCIA AERÓBICA DEPENDE EN GRAN MEDIDA DE: (Wilmore y Costill 2000)

☞ Un valor **elevado** de **VO₂máx**

☞ Un **bajo VO₂** para un nivel de **esfuerzo submáximo determinado**.

☞ Un **umbral** de lactato (**anaeróbico**) **alto** → Mayor capacidad para rendir a un % más elevado del VO₂máx

☞ Alto % de **FIBRAS MUSCULARES de CL**.