



Prof. Edgar Lopategui Corsino
M.A., Fisiología del Ejercicio

ACCESO: http://www.saludmed.com/ejercicio/contenido/Sistema-de_Transporte-de-Oxigeno.pdf

EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE OXÍGENO

I. CONSIDERACIONES CONCEPTUALES PRELIMINARES

A. Consumo de Oxígeno ($\dot{V}O_2$)

1. Definición:

- a. La proporción a la cual el oxígeno es utilizado por las mitocondrias (metabolismo aeróbico) de todas las células del cuerpo, en función respiratoria interna o celular.
- b. La cantidad de oxígeno (en litros [L] o mililitros [mL]) extraído del aire/gas ambiental inspirado durante un periodo de tiempo (usualmente en un [1] minuto), en condiciones estandarizadas (STPD) de los volúmenes del aire/gas inspirado.

2. Unidades de medida comunes en que se expresa:

a. Valores **absolutos**:

- 1) Litros (L) de oxígeno consumido por minuto:

$$\dot{V}O_2, \text{L} \cdot \text{min}^{-1} \text{ o } \text{L}/\text{min}$$

- 1) Mililitros (mL) de oxígeno consumido por minuto:

$$\dot{V}O_2, \text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \text{ o } \text{mL}/\text{min}$$

a. Valores **relativos**:

- 1) A la **masa corporal** (MC) o peso:

- a) Mililitros (mL) de oxígeno consumido por kilogramo (kg) de la masa corporal por minuto:

$$\dot{V}O_2, \text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{ o } \text{mL}/\text{kg} \cdot \text{min} \text{ o } \text{mL}/\text{kg}/\text{min}$$

- 2) A la **masa corporal activa** (peso magro o libre de grasa):

- a) Mililitros (mL) de oxígeno consumido por la masa corporal activa (MCA) por minuto:

$$\dot{V}O_2, \text{mL} \cdot \text{MCA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{ o } \text{mL}/\text{kg} \cdot \text{min} \text{ o } \text{mL}/\text{kg}/\text{min}$$

3. Los valores obtenidos se estandarizan (STPD):

a. STPD = Un volumen de un gas en condiciones estándar de temperatura y presión, libre de vapor de agua (seco).

b. Las condiciones estandarizadas son:

1) Standard Temperature (Temperatura Estándar):

273°K ó 0°C

2) Standard Pressure (Presión Estándar):

760 mm Hg, es decir, a una atmósfera "estándar".

3) Dry (seco):

0% de humedad relativa, es decir, en ausencia de vapor de agua.

B. Consumo de Oxígeno Máximo ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$)

1. Definición:

a. El volumen de oxígeno que puede ser transportado y utilizado durante ejercicio máximo al nivel del mar (Rivera, Lopategui & Rivera, 1992).

b. El consumo de oxígeno más alto que un individuo puede alcanzar durante un ejercicio/trabajo físico que envuelva grandes grupos musculares mientras respira aire al nivel del mar (duración del ejercicio 2 a 6 min, dependiendo del tipo de ejercicio o carga de trabajo) (Åstrand & Rodahl, 1986, pág. 304).

2. Definición descriptiva (en base a su criterio evaluativo):

a. El punto en el cual el consumo de oxígeno se estabiliza (crea un "plato") y no muestra un aumento más allá (o solamente aumenta levemente) con cargas de potencias ergométricas adicionales (McArdle, Katch & Katch, 1991, pág. 131).

b. Una situación a intensidades altas de trabajo/ejercicio donde, a pesar de aumentos en la potencia ergométrica producida por el sujeto, el $\dot{V}O_2$ medido directamente no manifiesta aumentos adicionales bajo las condiciones ambientales dadas (en comparación con una relación estrictamente lineal entre potencia ergométrica y el $\dot{V}O_2$ a intensidades de ejercicio submáximas) (Wagner, 1991, pág. 133):

- 1) El "plato" alcanzado en el $\dot{V}O_2$ se conoce como $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}x}$.
 - a) Puede ser difícil de identificar en un sujeto dado.
 - b) Para una demostración convincente, comúnmente requiere:
 - ▲ Sujetos altamente motivados.
 - ▲ Individuos en buena condición física. (Wagner, 1991, pág. 133)
 - ▲ Que el sujeto trabaje una etapa sobre el punto real donde se alcanzó el $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}x}$ (esto requiere individuos altamente motivados).
 - c. Aquel valor de $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}x}$ que se alcanza al finalizar una prueba de ejercicio cardiopulmonar donde a pesar de aumentos en la potencia ergométrica (e.g., aumento en la velocidad y porcentaje de elevación de la banda sinfín) el $\dot{V}O_2$ se mantiene más o menos estable (Howley & Franks, 1986).

3. Definición operativa:

La máxima diferencia entre la media (promedio) a la cual entra en los pulmones el oxígeno inspirado y la media (promedio) a la que sale de los pulmones el oxígeno espirado (Lamb, 1984, pág. 173).

4. Definición descriptiva fisiológica:

La capacidad de aumentar la frecuencia cardíaca, incrementar el volumen de eyección sistólica, de distribuir el flujo sanguíneo hacia los músculos esqueléticos activos y la capacidad oxidativa de éstos tejidos.

5. $\dot{V}O_2$ pico versus $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}x}$:

a. Concepto: ($\dot{V}O_2$ pico):

El valor más alto del consumo de oxígeno que se obtiene durante una prueba ergométrica progresiva de esfuerzo.

b. Indicaciones para su uso:

- 1) No se observa el criterio generalmente aceptado para alcanzar un $\dot{V}O_{2\text{m}\acute{a}x}$ (estabilización del $\dot{V}O_2$ a pesar de aumentos en la potencia ergométrica).
- 2) La prueba ergométrica de ejercicio se encuentra li-

mitada por factores locales (e.g., dolor muscular) en vez de por la dinámicas de la circulación central.

c. Implicaciones:

1) El $\dot{V}O_2$ pico alcanzado durante una prueba particular de ejercicio no necesariamente representa el verdadero $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ del sujeto.

2) Por otro lado, en la mayoría de los sujetos normales, las pruebas ergométricas que envuelvan las piernas producen un $\dot{V}O_2$ pico que se aproxima muy de cerca al valor real del $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, aún cuando no sea evidente un "plato" (estabilización) en el $\dot{V}O_2$ (Wasserman, Hansen, Sue & Whipp, 1987, pág. 29).

6. Criterios para determinar el consumo de oxígeno máximo durante una prueba ergométrica progresiva:

a. Una estabilización del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$):

El $\dot{V}O_2$ aumenta o disminuye por no más de 2 mL/kg min (150 mL/min) con aumentos en la intensidad del esfuerzo requerido.

b. La razón del intercambio respiratorio (R) alcanza un valor igual o mayor de 1.00:

Otros investigadores (Powers & Howley, 1990, pág. 430) plantean que la R debe ser mayor de 1.15

c. El valor de la frecuencia cardíaca (FC) se encuentra cerca (dentro de 10%) de la frecuencia cardíaca máxima estimada:

1) La FC durante la última etapa de la prueba se haya 10 latidos/min sobre o debajo de la frecuencia cardíaca máxima ajustada a la edad:

El error/desviación estándar de este valor ($220 - \text{Edad}$) fluctúa de 10 a 25 latidos/min.

d. Una estabilización de la frecuencia cardíaca (FC):

La FC alcanza un "plato"/equilibrio a pesar de incrementos en la intensidad de trabajo.

e. Fatiga subjetiva, agotamiento y la incapacidad de poder continuar.

f. Valores de lactato sanguíneo cerca o excediendo 10.0

mmol/L.

- h. Una percepción del esfuerzo (Escala Borg) de 19 a 20.
- i. Según Brooks y Fahey (1985, pág. 323), la medición del consumo de oxígeno máximo debe satisfacer los siguientes objetivos/criterios:
 - 1) La masa muscular utilizada durante el ejercicio debe como mínimo estar activada 50% de forma continua y rítmica durante un período de tiempo prolongado.
 - 2) Los resultados de la prueba no deben estar influenciados por factores de motivación o de destreza.
 - 3) Debe existir una nivelación del consumo de oxígeno mientras aumenta la intensidad del ejercicio.
 - 4) Las mediciones se deben realizar bajo condiciones experimentales estándar:

No se puede llevar a cabo bajo un ambiente estresor, el cual exponga al sujeto a estados excesivos de calor, humedad, contaminación ambiental o altitud.

- 7. Importancia fisiológica (deVries. 1986, págs. 224-225):
 - a. Representa un buen criterio para determinar cuan efectivamente diversas funciones fisiológicas pueden adaptarse a los aumentos en las demandas/necesidades metabólicas de trabajo o ejercicio:
 - b. Funciones fisiológicas que contribuyen a la magnitud de la habilidad del atleta en mantener un estado estable:
 - 1) Ventilación pulmonar.
 - 2) Difusión pulmonar.
 - 3) Transporte de oxígeno (O_2) y bióxido de carbono (CO_2) por la sangre.
 - 4) Función cardíaca.
 - 5) Ajustes vasculares (vasodilatación de tejidos activos y vasoconstricción de tejidos inactivos).
 - 6) Condición física de los músculos envueltos.

C. Sistema de Transporte de Oxígeno

1. Definición:

- a. El consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$), i.e., el producto del flujo sanguíneo sistémico central (gasto cardíaco) y la extracción de oxígeno de la sangre sistémica en la periferia (diferencia arterio-venosa de oxígeno).

- b. El sistema cardio-respiratorio, compuesto por el volumen de eyección sistólica (VES), la frecuencia cardíaca (FC) y la diferencia-arterio venosa (dif. a- $\bar{v}O_2$).

2. Principio de Fick:

- a. El consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) es igual al gasto cardíaco (\dot{Q} ó GC) por la diferencia arterio-venosa (Dif a- $\bar{v}O_2$).
- b. El gasto cardíaco es igual a la frecuencia cardíaca (FC) por el volumen de eyección sistólica (VES).

3. Fórmula/descripción matemática:

$$\dot{V}O_2 \text{ (mL/min)} = \dot{Q} \text{ (mL/min)} \times \text{Dif a-}\bar{v}O_2 \text{ (mL de } O_2/100 \text{ mL sangre)}$$

$$\dot{V}O_2 \text{ (mL/min)} = \text{FC (latidos/min)} \times \text{VES (mL/latido)} \times \text{Dif a-}\bar{v}O_2 \text{ (mL de } O_2/100 \text{ mL sangre)}$$

$$\dot{V}O_{2\text{máx}} \text{ (mL/min)} = \text{FCmáx (Latidos/min)} \times \text{VESmáx (mL/latido)} \times \text{Dif a-}\bar{v}O_{2\text{máx}} \text{ (mL de } O_2/100 \text{ mL sangre)}$$

II. FRECUENCIA CARDIACA (FC)

A. Concepto

El número de latidos ventriculares por minuto.

B. Frecuencia del pulso

1. Definición:

La frecuencia de las ondas de presión (ondas por minuto) propagadas a lo largo de las arterias periféricas, como la arteria carótida o la radial.

2. Comparación con la frecuencia cardíaca:

a. En individuos sanos y normales:

La frecuencia del pulso y frecuencia cardíaca son idénticas.

b. En personas con arritmias cardíacas:

Estas dos frecuencias no son las mismas.

C. Medición

1. Electrocardiograma.
2. Curvas de presión sanguínea.
3. Auscultación con un estetoscopio.
4. Palpación sobre el corazón.

D. Límites Normales Amplios

60 - 100 latidos/min.

E. Factores que Controlan y Afectan la Frecuencia Cardíaca

1. La frecuencia cardíaca es aumentada por:

- a. Disminución en la actividad de los barorreceptores en las arterias del corazón y de la circulación pulmonar (con el subsiguiente reajuste por los centros suprabulbares de integración):

1) Esto provoca:

- a) Un aumento en la actividad de los nervios simpáticos que van al nódulo seno-atrial (nodo SA o marcapaso) del corazón.

b. Aumento de hormonas circulantes:

1) Catecolaminas:

Epinefrina y norepinefrina.

2) Hormonas tiroideas

- c. Hipoxia (tensión reducida o inadecuada del oxígeno arterial).

d. Aumentos en la temperatura corporal.

e. Aumento en la concentración iónica sanguínea.

f. Reflejo de Bainbridge.

g. Proceso de inspiración.

h. Ejercicio agudo (estático o dinámico/isotónico).

i. Coraje y excitación (estrés).

j. Estímulos que inducen dolor.

2. La frecuencia cardíaca es disminuída por:

a. Incremento en la actividad de los barorreceptores en las arterias, ventrículo izquierdo y circulación pulmonar (con el subsiguiente reajuste por los centros suprabulbares de integración):

1) Esto provoca:

a) Una reducción en la actividad de las fibras simpáticas que terminan en el nodo SA del corazón.

b) Un aumento en la actividad o tono de las fibras parasimpáticas (reflejo vagal) que terminan en el nodo SA del corazón.

b. Acetilcolina.

c. Reducción en la concentración iónica de la sangre.

d. Proceso ventilatorio de espiración.

e. Incremento en la presión intracraneal.

f. Estimulación de las fibras de dolor del nervio trigémino.

g. Aflicción/depresión

F. Respuestas de la Frecuencia Cardíaca a un Ejercicio Agudo Submáximo

1. Ejercicios que envuelvan contracciones musculares isométricas:

La frecuencia cardíaca se eleva.

2. Ejercicios que realizan contracciones musculares isotónicas:

Inmediato incremento de la frecuencia cardíaca.

3. Ejercicios que se llevan a cabo bajo inmersiones en el agua (Rost, 1987, pág. 15):

a. Reducción en la frecuencia cardíaca (bradicardia de buzo/inmersión):

1) Causa/mecanismo:

a) Aumento en la actividad simpática (tono del nervio vago).

- b) Aumento en el retorno venoso ocasionado por el efecto boyante (falta de peso) del agua sobre el cuerpo.
- c) Déficit de oxígeno.
- d) Mecanismo de valsava.
- f) El mecanismo que envuelve la función receptora del nervio trigeminal.

2) Utilidad//propósito:

Representa una medida de economía que permite a una persona estar más tiempo debajo del agua.

G. Efectos Adaptativos (Entrenamiento de Tolerancia) de la Frecuencia Cardíaca

1. Durante el reposo:

a. Bradicardia atlética o inducida por el entrenamiento:

1) Ejemplos:

- a) Corredores pedestres de larga distancia de clasificación elite:

Estos exhiben una frecuencia cardíaca de reposo entre 15 a 25 latidos/min menor que aquella de la población general (Goss, 1978, pág. 56).

2) Posibles causas (teorías):

- a) Alteraciones en la actividad del sistema nervioso autonómico (central):

- ▲ Aumento en la actividad parasimpática a través de un incremento en el tono vagal.

- ▲ Reducción en la actividad simpática al nodo SA.

- b) Un aumento en el volumen de eyección sistólica (Rost, 1987, pág. 50):

Este incremento en la cantidad de sangre que bombea el corazón posiblemente ocasiona una disminución en el estímulo nervioso que se dirige al corazón (i.e., una retroalimentación negativa), de manera que se reduzca la frecuencia cardíaca.

2. Durante un ejercicio agudo submáximo:

- a. Reducción en la frecuencia cardíaca para una intensidad de ejercicio dada:

Se ha observado que esto ocurre cuando se utilizan los mismos músculos envueltos durante el entrenamiento (Goss, 1978, pág. 57).

3. Durante un ejercicio máximo:

- a. Disminución en la frecuencia cardíaca máxima (FC_{máx}):

1) Causas/mecanismos (Goss, 1978, pág. 57):

- a) Cambios en el control del sistema nervioso autónomo.
 b) Aumento en el volumen de eyección sistólica.
 c) Reducción en las catecolaminas circulantes.

H. Importancia para la Circulación Central, Transporte de Oxígeno y Circuito Coronario

1. Representa el primer determinante del gasto cardíaco, particularmente durante un ejercicio máximo.
2. Un aumento en la frecuencia cardíaca sirve como mecanismo rápido para incrementar el transporte de oxígeno durante el ejercicio.
3. Existe una alta correlación entre el flujo de sangre coronario y la frecuencia cardíaca.

III. VOLUMEN DE EYECCION SISTOLICA (VES)

A. Concepto

El volumen de sangre eyectada (bombeada) hacia la arteria principal por cada contracción (sístole o latido del corazón).

B. Cálculo

1. Dividiendo el gasto cardíaco (\dot{Q}) por la frecuencia cardíaca (FC):

$$VES = \frac{\dot{Q} \text{ (L/min)} \times 1000}{FC \text{ (Latidos/min)}}$$

2. Determinando la diferencia entre el volumen sanguíneo contenido en el ventrículo al final de la diástole (volumen ventricular diastólico final [VVDF]) y el volumen que queda al final de la sístole (volumen ventricular sistólico final [VVSF]):

$$\text{VES} = \text{VVDF} - \text{VVSF}$$

C. Límites Normales Amplios

1. Índice de eyección (índice cardíaco [mL/min] dividido entre la frecuencia cardíaca):

30 a 65 mL/latido/m²

2. Volumen de eyección sistólica:

a. 60 - 70 mL/latido (posición erecta/de pie).

b. 60 - 130 mL/latido (límites normales amplios).

D. Factores que Controlan/Regulan y Afectan el Volumen de Eyección Sistólica

1. Actividad de los nervios simpáticos que van al corazón.

2. Hormonas:

Epinefrina y norepinefrina plasmática.

3. Volumen ventricular diastólico final (pre-carga):

Este a su vez es determinado por:

a. El volumen ventricular.

b. Tiempo del llenado ventricular y retorno venoso (el volumen de sangre venosa que regresa al corazón - Ley de Starling).

c. Contractilidad ventricular (la fuerza de la contracción del ventrículo).

d. Resistencia periférica total (pos-carga).

E. Respuesta del Volumen de Eyección Sistólica a un Ejercicio Agudo Submáximo

1. Aumenta hasta el 25% del $\dot{V}O_2$ máx, punto en el cual tiende a estabilizarse.

2. Luego de haber alcanzado el VES pico, aumentos adicionales

les en el gasto cardíaco es posible mediante el incremento en la frecuencia cardíaca.

F. Efectos Adaptativos (Entrenamiento) del Volumen de Eyección Sistólica

1. Durante el reposo:

El volumen de eyección sistólica aumenta luego de un entrenamiento de tolerancia.

2. Durante un ejercicio agudo submáximo:

a. Aumenta el volumen de eyección sistólica.

b. Magnitud del aumento (Rost, 1987, pág. 8):

1) Depende de la posición del cuerpo (efecto ortostático):

a) Supinación (boca arriba):

▲ Utilización de la técnica del tinte diluido:

25% de incremento.

▲ Utilizando el principio de Fick:

10% de incremento.

b) Sentado:

30 - 50% de incremento.

c) De pie:

100 % de aumento.

c. Causa principal para dicho aumento:

Un vaciado más completo durante la sístole, lo cual requiere un aumento en la fuerza de la contracción ventricular.

3. Durante un ejercicio máximo:

a. Incrementa el volumen de eyección sistólica.

b. Volumen de eyección sistólica máxima:

1) Se obtiene inmediatamente después del ejercicio:

a) Causas:

- ▲ Reducción rápida en la frecuencia del pulso.
 - ▲ El retorno venoso se mantiene a niveles muy altos.
4. Magnitud porcentual del aumento en el volumen de eyección sistólica luego de un entrenamiento:
 - a. Alrededor de 20%
 - b. El VES más alto reportado en la literatura ha sido de 205 mL.
 5. Causas/factores para el aumento en el volumen de eyección sistólica como resultado del entrenamiento:
 - a. Aumento en el llenado ventricular (incremento en el volumen ventricular diastólico final o activación del mecanismo de Frank-Starling):
 - 1) Esto es inducido por la reducción en la frecuencia cardíaca.
 - 2) Este proceso es facilitado por:
 - a) Un aumento en el volumen ventricular.
 - b) Aumento en el espesor de las paredes ventriculares.
 - c) Aumento en el volumen sanguíneo (Particularmente plasma).
 - d) Aumenmto en la entrada de calcio (Ca^{2+}) y las actividades inter-vinculadas entre el Ca^{2+} , miosina y la enzima ATPase:

Esto mejora la contractilidad del miocardio (músculo del corazón).

G. Importancia para el Sistema de Transporte de Oxígeno

1. Se considera el factor más importante que determina las diferencias individuales en el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.
2. Junto a la frecuencia cardíaca, ayuda a que la utilización energética del corazón sea más eficiente.

IV. GASTO CARDIACO (VOLUMEN MINUTO CARDIACO O DEBITO CARDIACO) (\dot{Q})

A. Concepto

La cantidad o volumen de sangre eyectada/impulsada (bombeada) hacia la arteria principal por cada ventrículo en un minuto.

B. Índice Cardíaco:

1. Concepto/descripción:

- a. El gasto cardíaco dividido por metro cuadrado de área de superficie corporal.
- b. Relaciona el volumen del flujo cardíaco con el tamaño del corazón.

2. Utilidad/objetivo:

- a. Comparar los gastos cardíacos de personas de diferentes volúmenes corporales.
- b. Justificación/validez de su uso:

1) El gasto cardíaco cambia netamente según el volumen corporal:

- a) El gasto cardíaco aumenta aproximadamente en proporción a la superficie del cuerpo:

Por ejemplo, los individuos corpulentos tienen un gasto cardíaco más elevado que en las personas pequeñas.

3. Valores normales:

2.5 - 4.2 L/min/m²

4. Unidades de expresión:

- a. Litros (L) por minuto (min) por metro cuadrado (m²):

L/min/m²

C. Unidades de Medida para Expresar el Gasto Cardíaco

1. Litros (L) por minuto (min): L/min

2. Mililitros (mL) por minuto (min): mL/min

D. Medición/Método de Determinación

1. Método directo de Fick (Adolph Fick, 1870):

- a. Postula que la cantidad de una substancia captada por un órgano (o por el cuerpo entero), en la unidad de tiempo, es igual a la concentración arterial de la substancia menos la concentración venosa (la diferencia $a-\bar{v}$) multiplicada por el flujo sanguíneo:

En otras palabras, la cantidad del oxígeno transportado a los tejidos debe ser igual al oxígeno transportado hacia los pulmones por la arteria pulmonar.

- b. Fórmula/expresión matemática:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{V}O_2}{(C_aO_2) - (C_vO_2)} \times 100, \text{ donde}$$

$$\dot{Q} = \text{Gasto cardíaco (L/min)}$$

$$\dot{V}O_2 = \text{Consumo de Oxígeno (mL/min)}$$

$$C_aO_2 = \text{Contenido de Oxígeno en la Sangre Arterial (mL/L)}$$

$$C_vO_2 = \text{Contenido de Oxígeno en la Sangre Venosa (mL/L)}$$

2. Técnica de la dilución de indicadores (tintes colorantes).
3. Método de la presión diferencial (presión del pulso).

E. Ecuación

$$\dot{Q} = FC \times VES, \text{ donde}$$

$$\dot{Q} = \text{Gasto Cardíaco (mL/min)}$$

$$FC = \text{Frecuencia Cardíaca (latidos/min)}$$

$$VES = \text{Volumen de Eyección Sistólica (mL/latido)}$$

F. Límites Normales en Reposo en la Posición Supina

1. Varón joven y sano:

5.6 L/min

2. Todos los adultos (incluyendo personas de edad avanzada y mujeres):

5.0 L/min

3. Diferencias entre sexos:

En general, el gasto cardíaco en una mujer es aproximadamente 10 por ciento menor en el varón de igual volumen corporal.

4. Límites normales amplios:

4 - 6 L/min (6.0 ± 2.0 , dependiendo del tamaño corporal).

G. Factores que Controlan y Afectan el Gasto Cardíaco

1. Frecuencia cardíaca (FC):

Inervación de los nervios simpáticos o parasimpáticos.

2. Volumen de eyección sistólica (VES):

a. Dotación neural:

Longitud de las fibras musculares cardíacas (regulación heterométrica).

3. Intensidad del retorno venoso:

a. En circunstancias normales se considera el factor determinante principal del gasto cardíaco.

b. Factores de la circulación periférica:

1) Establecen la intensidad del retorno de sangre venosa al corazón:

2) Ejemplos:

a) Vasoconstricción refleja de las venas en las piernas.

b) Actividad dinámica de los músculos esqueléticos:

▲ Efecto:

Masaje de las contracciones de la musculatura en las piernas.

c) Presencia de válvulas en las venas de las extremidades inferiores.

c. Efectos de los movimientos respiratorios (los cambios normales de la presión intratorácica que ocurren con la respiración).

- d. Cambios en las necesidades metabólicas periféricas (e.g., ejercicio):
 - 1) Catecolaminas:
 - a) Aumentan la contracción del lecho venoso:
 - Esto favorece el retorno venoso.
 - e. Modificación de la postura.
- 4. Volumen cardíaco:
 - a. Hipertrofia ventricular izquierda (e.g., atleta):
 - Aumenta el nivel permisivo para la fuerza de bombeo del corazón.
- 5. Estimulación del corazón por el sistema nervioso autonómico.
- 6. Resistencia periférica total:
 - a. Venoespasm:
 - Mejorará el gasto cardíaco al elevar un poco el gradiente de presión para el retorno venoso, lo cual desplaza la sangre de la circulación periférica hacia la pulmonar.
 - b. Vasodilatación en la circulación periférica:
 - Aumenta el retorno venoso y gasto cardíaco.
- 7. Intensidad del metabolismo local de cada tejido:
 - El gasto cardíaco aumenta conforme aumente también la intensidad del ejercicio y sus necesidades energéticas (determinado por el consumo de oxígeno).
- 8. El grado de llenado de la circulación:
 - a. Determina:
 - El retorno venoso.
 - b. Presión del llenado sistémico.
- 9. Fuerza de la contracción cardíaca (contractilidad):
 - a. Determinantes:

- 1) Longitud de las fibras.
 - 2) Duración de la pausa diastólica:
La integridad y masa del miocardio.
 - 3) El aporte de oxígeno.
- b. Ley de Starling del corazón:
- 1) Esta ley establece que "la energía de contracción es proporcional a la longitud inicial de la fibra del músculo cardíaco":

Cuanto más grande sea la longitud inicial de las fibras del músculo cardíaco también mayor será la fuerza de la contracción.
10. Presión arterial.
11. Mecanismo de control:
- a. Reflejos corticales (corteza cerebral).
 - b. Impulsos humorales (hormonas).
 - c. Quimiorreceptores.
 - d. Presorreceptores (barorreceptores).
12. Otras condiciones o factores:
- a. El gasto cardíaco aumenta con:
 - 1) Estimulación simpática.
 - 2) Liberación de catecolaminas:
Aumentan la frecuencia cardíaca por la estimulación simpática (acción cronotrópica).
 - 3) Inhibición de impulsos parasimpáticos para el corazón:

Suprime el tono parasimpático, permitiendo que la frecuencia cardíaca aumente, lo cual eleva la eficiencia del bombeo.
 - 4) Disminución de la presión arterial general.
 - 5) Ejercicio (700% de aumento).

- 6) Ansiedad y excitación (50-100%).
- 7) Comida (30%).
- 8) Temperatura ambiental alta.
- 9) Histamina.

H. Respuestas del Gasto Cardíaco a un Ejercicio Agudo Submáximo

1. Antes del ejercicio (cambios anticipados):

- a. De solo pensar que se realizará una actividad física o competencia deportiva:

Se estimula el sistema nervioso autonómico, lo cual incrementa la frecuencia cardíaca y la fuerza de cada contracción (contractilidad), aumentando el gasto cardíaco de 13 a 25 litros por minuto (incluso hasta 35 litros/min en atletas que participan en eventos de tolerancia).

- 2. Cuando comienza el ejercicio, el gasto cardíaco aumenta hasta valores que pueden exceder de 35 litros/min, donde la cantidad de dicho incremento es proporcional al aumento en el consumo de oxígeno:

- a. Causas/mecanismos principales envueltos:

- 1) En individuos no entrenados:

- a) Aceleración de la frecuencia cardíaca.
- b) Un modesto incremento en el volumen de eyección sistólica.

- 2) En atletas:

- a) Principalmente por la mayor capacidad de éstos para incrementar el volumen de eyección sistólica (Ekblom, 1969):

Entre mejor condición física (nivel de entrenamiento) se encuentre la persona, tanto mayor será la contribución del aumento en el volumen de eyección sistólica para incrementar el gasto cardíaco durante el ejercicio.

- b. Otras causas (vía mecanismos de control homeostáticos):

- 1) Ordenes nerviosas de la corteza motora al hipotálamo

mo, y en consecuencia a los centros bulbares:

a) Esto aumenta la actividad simpática, lo cual resulta en:

▲ Incremento en la frecuencia cardíaca, en el volumen de eyección sistólica y contractilidad cardíaca.

▲ Vasodilatación de los vasos sanguíneos musculoesqueléticos activos (como resultado del estímulo vía fibras nerviosas simpáticas):

◆ Esto duplica el aumento en el retorno venoso, lo cual origina un nuevo aumento instantáneo del gasto cardíaco (valores que podrían alcanzar el doble de lo normal).

◆ Es importante señalar que el aumento del flujo sanguíneo hacia el músculo esquelético es directamente proporcional al aumento del consumo de oxígeno del individuo.

2) Aumento en el tono de los músculos esqueléticos y de la pared alrededor de los vasos sanguíneos periféricos.

3) El aumento del metabolismo de los tejidos activos (particularmente los músculos esqueléticos):

a) Produce un notable incremento en el consumo de oxígeno y de otros nutrientes:

▲ Según progrese la intensidad del ejercicio, aumenta el gasto cardíaco en relación lineal con el consumo de oxígeno hasta que se alcance el estado estable del $\dot{V}O_2$, donde el gasto cardíaco se mantiene generalmente constante (i. e., el gasto cardíaco aumenta en proporción directa con el incremento de las necesidades energéticas [ATP] aeróbicas de los tejidos musculoesqueléticos activos, tanto para atletas como para la población general):

Esto implica que en este punto el flujo sanguíneo (de la circulación sistémica, reflejado por el gasto cardíaco) es suficiente para satisfacer los requisitos metabólicos del ejercicio (evidenciado por el equilibrio dinámico del $\dot{V}O_2$ durante el estado estable).

b) Promueve la liberación de sustancias vasodilata-

doras (metabólitos), los cuales aumentan directamente la vasodilatación local:

Esto ocasiona una disminución neta de la resistencia periférica total, lo cual es un factor principal para que aumente el gasto cardíaco durante el ejercicio.

I. Respuesta del Gasto Cardíaco a un Ejercicio Máximo:

1. El incremento del gasto cardíaco necesario para tal ejercicio máximo depende principalmente de un aumento en el volumen de eyección sistólica:

- a. Cuando el ejercicio es intenso y hay un considerable aumento del gasto cardíaco, el trabajo del ventrículo izquierdo puede aumentar hasta cuatro veces.
- b. La capacidad de aumentar el gasto cardíaco mediante un incremento en el volumen de eyección sistólica se observa cuando se poseen bajos valores en la frecuencia cardíaca de reposo (bradicardia atlética) y en determinados niveles de intensidad.

2. Relación con el consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$):

a. Un aumento en el gasto cardíaco máximo resulta de un incremento directamente proporcional (positivamente lineal) con el potencial para el metabolismo aeróbico:

1) Ejemplos:

- a) Un nivel bajo en la capacidad aeróbica se encuentra asociado con un bajo gasto cardíaco máximo.
- b) La habilidad de generar un $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ de 5 a 6 litros por minuto siempre se encuentra acompañado de un aumento en el gasto cardíaco de 30 a 40 litros por minuto.

J. Efectos Adaptativos de un Ejercicio Crónico (Entrenamiento de Tolerancia) en el Gasto Cardíaco

1. Durante el reposo:

a. Diversos estudios han encontrado que el gasto cardíaco de individuos entrenados es levemente menor en comparación con el de los no entrenados (Rost, 1987, pág. 55):

1) Posibles causas:

a) Reducción en el retorno venoso:

Esto a su vez probablemente es ocasionado por un aumento en el tono vagal.

2. Durante un ejercicio submáximo:

a. Se ha reportado que el gasto cardíaco no cambia a intensidades submáximas luego de un entrenamiento aeróbico en sujetos normales:

1) Por consiguiente, dado una misma intensidad de ejercicio submáximo, el gasto cardíaco es el mismo tanto para atletas entrenados como para personas no entrenadas:

Fisiológicamente esto puede ser explicado por el hecho de que tanto los individuos entrenados como los no entrenados alcanzan una estabilización del consumo de oxígeno, lo cual nos indica que el gasto cardíaco (factor limitante para el transporte de oxígeno) ha llegado también a un estado más o menos estable.

3. Durante un ejercicio máximo:

a. 50% del aumento en el consumo de oxígeno máximo observado en atletas de tolerancia es ocasionado por un mayor gasto cardíaco (el otro 50% lo produce la diferencia arterio-venosa de oxígeno) (Ekblom, 1968).

b. Ekblom (1968) encontró que corredores pedestres de larga distancia registraban un gasto cardíaco promedio de 36.8 litros/min ($n=7$), con un atleta alcanzando el valor más alto de 42.3 litros/min. En 8 varones no entrenados la media del gasto cardíaco fue de 23.9 litros/min:

Estos valores en atletas representan el doble del aumento en el gasto cardíaco al compararse con los valores de los sujetos no entrenados.

c. Como habíamos mencionado, la causa principal para este aumento en el gasto cardíaco máximo en atletas es originado principalmente por el incremento en el volumen de eyección sistólica (Rost, 1987, pág. 59).

K. Importancia para El Sistema de Transporte de Oxígeno

1. El gasto cardíaco es el factor central (cardíaco) más importante que afecta y limita (determina) los cambios en el $\dot{V}O_2$ máx:

Esto implica que el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ se encuentra limitado por la incapacidad del gasto cardíaco para poder continuar aumentando.

V. DIFERENCIA ARTERIO-VENOSA DE OXIGENO (Dif a- $\bar{v}O_2$)

A. Concepto

La diferencia en el contenido de oxígeno entre la sangre arterial (la sangre que ingresa en los capilares pulmonares) y la sangre venosa mixta (aquella que deja los capilares pulmonares) del lado derecho del corazón.

B. Unidades de Medida para Expresar la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno

1. Vol %:

mL de oxígeno/100 mL de sangre (mL/100 mL ó mL/dL).

C. Medición/Método de Determinación

1. Contenido arterial de oxígeno (C_aO_2):

Se analiza en muestras de sangre tomadas de una arteria sistémica, por lo general la arteria femoral, braquial o radial.

2. Contenido de oxígeno en la sangre venosa mixta (C_vO_2):

Se determina en una muestra de sangre extraída con un largo tubo delgado (catéter), introducido en una vena cubital y pasado luego a través del atrio y del ventrículo derecho hacia el interior de la arteria pulmonar.

D. Fórmula/Expresión Matemática

$$\text{Dif a-}\bar{v}O_2 = C_aO_2 - C_vO_2$$

E. Factores Fisiológicos que Reflejan/Representan la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno

1. La capacidad oxidativa de los músculos esqueléticos activos durante el ejercicio (i.e., la cantidad de oxígeno que extraen y utilizan las células/fibras musculo-esqueléticas de sangre arterial):

a. Durante un ejercicio agudo:

- 1) Aumenta la diferencia a- $\bar{v}O_2$ debido a que los músculos activos extraen una mayor cantidad de oxígeno que los tejidos inactivos, dejando así menos oxígeno

no en la sangre venosa.

- 2) Aquellos cuyos músculos tengan mitocondrias altamente activas podrán extraer de forma muy rápida el oxígeno que les suministra la sangre.

2. La distribución global del flujo sanguíneo (gasto cardíaco) hacia los tejidos corporales:

a. Significado durante un ejercicio agudo:

- 1) La capacidad del sistema circulatorio para redistribuir/transferir el flujo de sangre (gasto cardíaco) desde las regiones/tejidos inactivos o de baja extracción (e.g., lecho esplácnico) hacia las áreas/tejidos activos o de alta extracción (e.g., músculos esqueléticos ejercitándose):

Una persona que pueda desviar la mayoría de su sangre a los músculos que trabajan durante el ejercicio tendrán una gran diferencia de oxígeno arterio-venosa porque los músculos activos podrán extraer más oxígeno de la sangre que los tejidos inactivos del cuerpo.

F. Factores que Controlan y Afectan la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno Durante el Ejercicio

1. La capacidad de redistribuir/desviar una gran fracción del gasto cardíaco (circulación central) hacia los músculos esqueléticos activos:

a. Ejemplo:

Un aumento en la redirección de la circulación sistémica en los tejidos inactivos hacia los músculos esqueléticos que trabajan incrementará la disponibilidad de oxígeno para el metabolismo muscular.

2. La facultad de los músculos esqueléticos ejercitándose para extraer y utilizar una mayor cantidad de oxígeno del abastecimiento sanguíneo arterial:

a. Determinantes:

- 1) La microcirculación local/de los músculos esqueléticos:

Densidad capilar en los músculos (la proporción de los capilares a las fibras musculo-esqueléticas).

- 2) La habilidad de las células musculo-esqueléticas in-

dividuales para generar energía aeróbicamente:

a) Factores que afectan esta capacidad:

- ▲ Cantidad y tamaño de las mitocondrias.
- ▲ Número de enzimas mitocondriales.
- ▲ Concentración de mioglobina.
- ▲ Dirección del desplazamiento de la curva de disociación de la oxihemoglobina.

b) Efectos de estos cambios locales:

Determina la capacidad para la producción aeróbica de ATP así como la facultad de la célula para generar un metabolismo aeróbico en estado estable sin un aumento en el lactato sanguíneo (McArdle, Katch & Katch, 1991, pág. 339).

G. Respuestas de la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno Durante un Ejercicio Agudo Submáximo

1. Aumento progresivo y lineal de la diferencia $a-\bar{v}O_2$ conforme aumenta la intensidad del ejercicio:

a. Aumenta la extracción del oxígeno de la sangre arterial a medida que el ejercicio se torna más intenso:

Como se había indicado en exposiciones anteriores, el flujo sanguíneo durante el ejercicio se redistribuye, con el fin primordial de suministrar oxígeno a los tejidos metabólicamente activos y de eliminar el bióxido de carbono producido.

b. Este aumento en la extracción de oxígeno como respuesta a un ejercicio dinámico agudo es mucho más lenta que la respuesta observada en el gasto cardíaco.

c. Se ha observado también un aumento lineal en la diferencia $a-\bar{v}O_2$ del miocardio (músculo del corazón) durante el ejercicio.

H. Respuestas de la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno a un Ejercicio Máximo

Los valores de la diferencia $a-\bar{v}O_2$ máximos son del orden de 13-16 mL O_2 /100 mL de sangre (aproximadamente tres veces los valores en reposo).

J. Efectos Adaptativos de un Ejercicio Crónico (Entrenamiento de

Tolerancia) en la Diferencia Arterio-Venosa de Oxígeno

1. Durante un ejercicio submáximo:

- a. La diferencia $a-\bar{v}O_2$ durante intensidades submáximas no cambia (o el cambio es insignificante) luego de un entrenamiento de tolerancia:

Existe muy poca diferencia en la dif $a-\bar{v}O_2$ durante una actividad física submáxima entre atletas de tolerancia y personas sedentarias.

2. Durante un ejercicio máximo:

- a. El mejoramiento en la extracción de oxígeno (i.e., extensión de la diferencia $a-\bar{v}O_2$) en el músculo esquelético durante un ejercicio máximo es responsable por un 50% en el incremento del oxígeno transportado y utilizado en las fibras musculo-esqueléticas ($\dot{V}O_{2,máx}$) registrado en aquellos atletas que entrenan eventos de tolerancia:

1) Causas/mecanismos:

- a) El flujo sanguíneo se redistribuye más efectivamente durante el ejercicio, de tal modo que los músculos esqueléticos, con su alta capacidad para extraer oxígeno, puede recibir de un 80 a un 85% del gasto cardíaco, en comparación de un 15% en reposo (Åstrand & Rodahl, 1986, pág. 179).

b) Adaptaciones mitocondriales:

Aumento en el número y volumen de las mitocondrias en las células musculo-esqueléticas entrenadas.

- c) Incremento en el potencial de los sistemas enzimáticos para el transporte y utilización del oxígeno a nivel de las fibras musculo-esqueléticas activas.

d) Desplazamiento hacia la derecha de la curva de distribución de la oxihemoglobina:

La curva de disociación del oxígeno se desplaza de tal modo que se reduce una mayor cantidad de oxihemoglobina que la normal a una presión dada de oxígeno, es decir, el porcentaje de saturación es menor ("efecto Bohr") (Åstrand & Rodahl, 1986, pág. 179).

e) Elevación de las concentraciones en la mioglobina

sanguínea:

Esto favorece el transporte de oxígeno desde los capilares.

f) Aumento en la densidad capilar de los músculos esqueléticos, lo cual resulta en:

▲ Un acomodamiento eficiente en el aumento del flujo sanguíneo hacia el tejido musculo esquelético durante el ejercicio máximo.

▲ Disminución de la distancia de difusión entre la circulación y la fibra muscular (específicamente la mitocondria):

Esto provee una mayor superficie de contacto para el intercambio de nutrientes y gases metabólicos durante el ejercicio.

▲ Reducción en la velocidad del flujo sanguíneo, de manera que haya más tiempo para llevar a cabo la difusión:

Esto permite un transito más lento de hematies (globulos rojos) a lo largo de las células musculares, de suerte que se pueda facilitar dicha difusión.

K. Importancia para el Sistema de Transporte de Oxígeno

1. Representa el factor periférico (extracción) de mayor importancia responsable por los cambios en la capacidad aeróbica:

Como consecuencia, el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ no podrá continuar su aumento si la diferencia arterio-venosa no se amplía, i.e., la diferencia $a-\bar{v}O_2$ limita la mitad del potencial para mejorar la facultad de los músculos esqueléticos entrenados de generar ATP aeróbicamente a niveles máximos y funcionar a una baja presión parcial de oxígeno (McArdle, Katch & Katch, 1991, pág. 337).

VI. FACTORES QUE DETERMINAN Y LIMITAN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE OXIGENO (CONSUMO MAXIMO DE OXIGENO)

A. El Sistema Pulmonar/Respiratorio

1. En individuos saludables que se ejercitan a nivel del mar:

a. El $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ no se encuentra limitado por la habilidad

del sistema pulmonar en mantener las presiones del oxígeno arterial:

1) Explicación/razón:

Comunmente existe una reserva considerable en el sistema pulmonar.

2. En atletas que compiten en eventos que demandan una alta capacidad cardio-respiratoria (a nivel del mar):

a. Existe una limitación en la capacidad pulmonar para mantener el contenido arterial de oxígeno y una alta diferencia arterio-venosa de oxígeno:

1) Explicación/razón:

Durante ejercicios de tolerancia a unas altas intensidades, la hipoventilación que experimentan estos atletas y el elevado flujo sanguíneo pulmonar (en o cerca del $\dot{V}O_2$ máx) puede desarrollar una desaturación del oxígeno arterial, lo cual resulta en hipoxemia arterial (baja concentración de oxígeno en la sangre).

B. Circulación Central

1. Concepto:

Transporte circulatorio de oxígeno hacia los músculos esqueléticos activos.

2. Factores que incluye:

a. Rendimiento del corazón:

1) Gasto cardíaco máximo:

a) Limita el $\dot{V}O_2$ máx:

▲ Explicación/razón:

No puede satisfacer por completo las demandas metabólicas de grandes masas musculares activas intensamente.

b. Volumen sanguíneo total y su capacidad de transporte:

1) Concentración de hemoglobina en la sangre arterial:

a) Aumenta con hemoconcentración (un aumento relativo en el número de globulos rojos del plasma):

▲ Ejemplos:

◆ Dopaje sanguíneo.

◆ Hiperoxia.

b) Disminuye con hemodilución:

▲ Ejemplo:

Expansión del plasma.

c. Mecanismos neuro-reguladores:

Actividad de los barorreceptores.

C. Circulación Periférica

1. Diferencia arterio-venosa de oxígeno:

a. Adaptación vascular (tono vasomotor):

1) Vasodilatación en la región de los tejidos activos:

Capacidad de los vasos sanguíneos para desviar la sangre hacia los músculos esqueléticos activos, donde la demanda de oxígeno es mayor.

2) Vasoconstricción en la región de los tejidos inactivos:

Capacidad de los vasos sanguíneos para enviar un menor flujo de sangre hacia los tejidos que no trabajan durante un ejercicio dinámico.

b. La cantidad de oxígeno extraído de la sangre y usado por los tejidos activos.

D. Metabolismo Muscular

1. Capacidad oxidativa de los músculos esqueléticos:

a. Factor principal que determina la tolerancia aeróbica de un ejercicio/evento deportivo (e.g., carreras pedestres de larga distancia) (Brooks & Fahey, 1985, págs. 715-716).

b. Determinante principal de la capacidad metabólica oxidativa de los músculos activos:

1) Tipos de fibras musculo-esquelética:

- a) Fibras de contracción lenta, las cuales poseen:
 - ▲ Un alto contenido de mioglobina y mitocondrias.
 - ▲ Una alta capacidad oxidativa y baja capacidad glucolítica.
 - ▲ Baja fatigabilidad (se fatigan lentamente).
 - b) Fibras de contracción rápida, las cuales poseen:
 - ▲ Un pobre contenido de mioglobina y mitocondrias.
 - ▲ Una baja capacidad oxidativa y alta capacidad glucolítica.
 - ▲ Alta fatigabilidad (se fatigan rápidamente).
- 2) Actividad enzimática oxidativa.
 - 3) Cantidad y tamaño de las mitocondrias localizadas en las células/fibras musculo-esqueléticas activas.

VII. REFERENCIAS

1. Åstrand, Per-Olof y Kaar Rodahl. Textbook of Work Physiology: Physiological Bases of Exercise. 3ra. ed.; New York: McGraw-Hill Book Company, 1986, 756 págs.
2. Brooks, George A. y Thomas D. Fahey. Fundamentals of Human Performance. New York: Macmillan Publishing Company, 1987. 464 págs.
3. Butts, NK. "Profiles of Elite Athletes: Physical and Physiological Characteristics". En: Butts NK, (Ed) The Elite Athlete. Spectrum Publications, Inc, 1985. Págs. 183-207.
4. Costill, David L. Inside Running: Basics of Sports Physiology. Indianapolis: Benchmark Press, 1986. Págs. 11-16.
5. Dal Monte, A. "Exercise Testing and Ergometers" En: Dirix, A., A.G. Knuttgen y K.Tittel, (Eds) The Olympic Book of Sports Medicine. England: Blackwell Scientific Publications, 1988. Págs. 121-
6. De Vries, Herbert A. Physiology of Exercise: for Physical Education and Athletics. 4ta. ed.; Dubuque, Iowa: Wm. C. Brown Publishers, 1986. 591 págs.

7. Ejblom, Björn. "Effect of Physical Training on Oxygen Transport System in Man". Acta Physiologica Scandinava. Supplementum 328, 1969. 44 págs.
8. Ejblom, Björn & Lars Hermansen. "Cardiac Output in Athletes". Journal of Applied Physiology. Vol. 25, No. 5 (Noviembre, 1968). Págs. 619-625.
9. Fox, Edward L., Richard W. Bowers y Merle L. Foss. The Physiological Basis of Physical Education and Athletics. 4ta. ed.; Philadelphia: Saunders College Publishing Co., 1988. 734 págs.
10. Froelicher, Victor F. Exercise and the Heart: Clinical Concepts. 2da. ed.; Chicago: Year Book Medical Publishers, Inc., 1987. 508 págs.
11. Ganong, William F. Fisiología Médica. 10ma. ed.; México: Editorial El Manual Moderno, 1986. 691 págs.
12. Guyton, Arthur. Tratado de Fisiología Médica. 5ta. ed.; México: Nueva Editorial Interamericana, 1977. 1159 págs.
13. Hammond, H. Kirk & Victor F. Froelicher. "Exercise Testing for Cardiorespiratory Fitness". Sports Medicine. Vol. 1, 1984. Págs. 234-239.
14. Howley, Edward T. y B. Don Franks. Health/Fitness Instructor's Handbook. Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers, Inc., 1986. 377 págs.
15. Jones, Norman L. Clinical Exercise Testing. 3ra. ed., Philadelphia: W.B. Saunders Company. 1988. 325 págs.
16. Lamb, David R. Physiology of Exercise: Responses & Adaptations. 2da. ed.; New York: Macmillan Publishing Company, 1984. 489 págs.
17. Mahler, DA & Loke, J. "The physiology of marathon running". Physician Sportsmed Vol. 13, 1985. Págs. 85-97.
18. McArdle, William D., Frank I Katch y Victor L. Katch. Exercise Physiology: Energy, Nutrition, and Human Performance. 3ra. ed.; Philadelphia: Lea & Febiger, 1991. 853 págs.
19. Nieman, David C. Fitness and Sports Medicine: An Introduction. Ed. Rev., Palo Alto, CA: Bull Publishing Company, 1990. 600 págs.
20. Noble, Bruce J. Physiology of Exercise and Sport. St. Louis: Times Mirror/Mosby College Publishing, 1986,

570 págs.

21. Pate, Russell R. & Andrea Kriska. "Physiological Basis of Sex Difference in Cardiorespiratory Endurance". Sports Medicine. Vol. 1, 1984. Págs. 87-98.
22. Powers, Scott K. y Edward T. Howley. Exercise Physiology: Theory and Applications. Dubuque, I.A.: Wm. C. Brown Publishers, 1990. [589] págs.
23. Puhl, Jacqueline L. "Women and Endurance: Some Factors Influencing Performance". En: Drinkwater, Barbara L. (Ed) Female Endurance Athletes. Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers, Inc., 1986 Págs 41-
24. Rost Richard. Athletics and the Heart. Chicago: Year Book Medical Pub., 1987. Págs. 26-82.
25. Shephard, Roy J. Physiology and Biochemistry of Exercise New York: Praeger Publishers, 1982. 672 págs.
26. Shephard, Roy J. "Tests of Maximum Oxygen Intake: A Critical Review". Sports Medicine. Vol. 1, 1984. Págs. 99-124.
27. Sjodin B, & Svedenhag J. "Applied Physiology of Marathon Running". Sports Medicine. Vol. 2, 1985. Págs. 83-99.
28. Smith ML, Hudson DL, Graitzer AM & Raven PB: "Exercise training bradycardia: the role of autonomic balance". Med Sci Sports Exer Vol. 21, 1989. Págs. 40-44.
29. Snell, Peter G. & Jere H. Mitchell. "The Role of Maximal Oxygen Uptake in Exercise Performance". En: Loke, Jacob (Ed) Clinics in Chest Medicine. Exercise: Physiology and Clinical Applications. (Vol. 5, No. 1, marzo, 1984) Philadelphia: W.B. Saunders Company. Págs. 51-
30. Sparling, PB. "Physiological determinants of distance Running Pperformance". Physician Sportsmedicine. Vol. 12., 1984. Págs. 68-77.
31. Strand, Fleur L. Fisiología Humana: Un Enfoque Hacia los Mecanismos Reguladores. México: Editorial Interamericana, 1982. 694 págs.
32. Sutton, John R. "Limitations to Maximal Oxygen Uptake". Sports Medicine. No. 13, Vol. 2, 1992. Págs. 127-133.

33. Thomas, Clayton L., editor. 14ma. ed.; Tabler's Cyclopedic Medical Dictionary. Philadelphia: F.A. Davis, 1981. 1818 págs.
34. Vander, Arthur J., James H. Sherman y Dorothy S. Luciano. Fisiología Humana. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill Latinoamericano, 1978. 466 págs.
35. Wagner, Peter D. "Central and Peripheral Aspects of Oxygen Transport and Adaptations with Exercise" Sports Medicine. No. 11, Vol. 13, 1991. Págs. 133-142.
36. Wasserman, Karlman, James E. Hansen, Darryl Y. Sue y Brian J. Whipp. Principles of Exercise Testing and Interpretation. Philadelphia: Lea & Febiger, 1987. 274 págs.
37. Weber, Karl T. y Joseph S. Janicki. Cardiopulmonary Exercise Testing: Physiologic Principles and Clinical Applications. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 1986. 378 págs.
38. Weber, Karl T., Joseph S. Janick & Patricia A. McElroy. "Determination of Aerobic Capacity and the Severity of Chronic Cardiac and Circulatory Failure". Circulation 76(suppl VI), 1987. Págs. VI-40-