

## FISIOLOGIA DEL EJERCICIO

### INTRODUCCIÓN

Durante la realización de ejercicio físico participan prácticamente todos los sistemas y órganos del cuerpo humano. Así el sistema muscular es el efector de las órdenes motoras generadas en el sistema nervioso central, siendo la participación de otros sistemas (como el cardiovascular, pulmonar, endocrino, renal y otros) fundamental para el apoyo energético hacia el tejido muscular para mantener la actividad motora.

En esta exposición nos centraremos en los aspectos metabólicos y adaptaciones que se dan en los diferentes órganos y sistemas de nuestro organismo, cuando realizamos ejercicios de cualquier naturaleza.

Las respuestas fisiológicas inmediatas al ejercicio son cambios súbitos y transitorios que se dan en la función de un determinado órgano o sistema o bien los cambios funcionales que se producen durante la realización del ejercicio y desaparecen inmediatamente cuando finaliza la actividad.

Si el ejercicio (o cualquier otro estímulo) persiste en frecuencia y duración a lo largo del tiempo, se van a producir adaptaciones en los sistemas del organismo que facilitarán las respuestas fisiológicas cuando se realiza la actividad física nuevamente.

### UTILIZACIÓN DE SUSTRATOS METABOLICOS DURANTE EL EJERCICIO FISICO.

La contracción muscular durante el ejercicio físico es posible gracias a un proceso de transformación de energía. La energía química que se almacena en los enlaces de las moléculas de los diferentes sustratos metabólicos (el ATP es la molécula intermediaria en este proceso) es transformada en energía mecánica (Figura1).

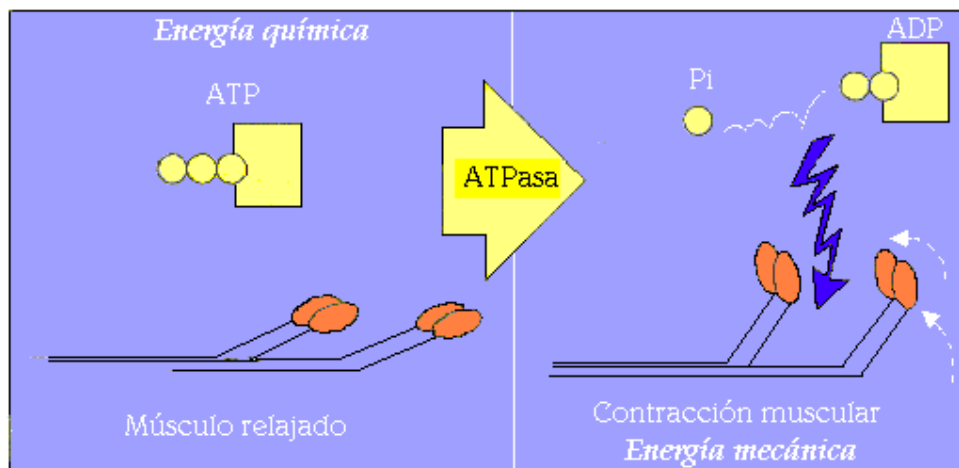


Fig. 1: La ruptura de un enlace rico en energía de la molécula de ATP proporciona energía química que provoca cambios en la ultraestructura de la miosina para que se produzca el proceso de la contracción muscular

En esta transformación gran parte de la energía liberada se pierde en forma de calor o energía térmica; esto tiene su ventaja ya que el aumento de temperatura provoca variaciones en diferentes reacciones metabólicas mediadas por complejos enzimáticos, posibilitando que estas reacciones sean más eficientes desde un punto de vista energético; por esta razón se recomienda realizar un adecuado calentamiento antes de la ejecución de un entrenamiento.

Los sustratos metabólicos que permiten la producción de ATP proceden de las reservas del organismo o de la ingestión diaria de alimentos.

Los sustratos mas utilizados en las diferentes rutas metabólicas durante el ejercicio físico son los HIDRATOS DE CARBONO Y LAS GRASAS.

Los SISTEMAS ENERGÉTICOS a partir de los cuales se produce la resíntesis del ATP para realizar el ejercicio físico son (Figura2)

1. El sistema de los fosfágenos: ATP y fosfocreatina (PC)
2. La glucólisis anaeróbica
3. Sistema aeróbico u oxidativo

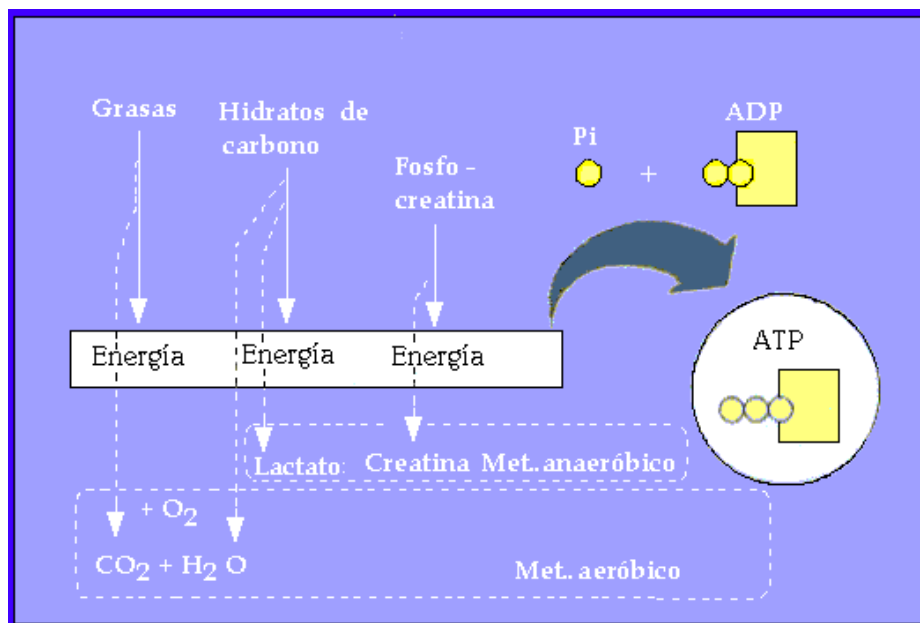


Fig. 2: Rutas metabólicas en el organismo para la obtención de energía a través de la resíntesis de las moléculas de ATP

La participación de éstos durante el ejercicio físico depende de la intensidad y duración del mismo.

### 1) SISTEMA DE LOS FOSFAGENOS O SISTEMA ANAERÓBICO ALACTICO:

Proporciona energía en actividad de muy alta intensidad y corta duración, y también al inicio de cualquier actividad física.

Los sustratos más importantes son el ATP y PC; otros son el ADP, AMP, GTP y UTP. Todos tienen enlaces fosfatos de alta energía.

**ATP:** se hidroliza gracias a la enzima ATPasa ubicada en las cabezas de miosina para desencadenar el desplazamiento de la actina que da lugar a la contracción. La energía que se libera en la hidrólisis de una molécula de ATP durante el ejercicio es de aproximadamente 7300 calorías (depende de temperatura y pH muscular)



Esta energía liberada se utiliza además que para realizar trabajo muscular, también para procesos de síntesis metabólicos y otras funciones celulares.

Sus reservas en la célula se agotarán en 1 segundo durante el esfuerzo físico.

**FOSFOCREATINA (PC):** permite la resíntesis rápida de ATP, luego de su utilización, ya que la transformación de energía no se llevará a cabo en su ausencia.

Esta resíntesis se realiza mediante una reacción catalizada por la creatinquinasa (CPK)

Que se activa con el aumento de la concentración de ADP



Las reservas de PC en la célula muscular se agotarían en 2 segundos durante ejercicios muy intensos si la célula dispusiera solo de este sustrato para mantener el trabajo desarrollado.

## 1) GLUCÓLISIS ANAERÓBICA

A través de este sistema sólo los hidratos de carbono pueden metabolizarse en el citosol de la célula muscular para obtener energía sin que participe directamente el oxígeno.

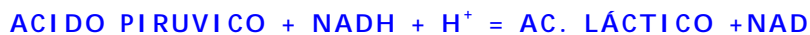
Gracias a éste se pueden resintetizar 2 ATP por cada molécula de glucosa.

Proporciona energía suficiente para mantener una intensidad de ejercicio desde pocos segundos hasta 1 minuto. El paso de glucosa al interior celular se realiza por transporte facilitado (difusión facilitada) gracias a un transportador de membrana llamado GLUT 4, y las reacciones de la célula.

Por otro lado parece que el aumento ácidos grasos libres (AGL) limita la captación y el consumo de glucosa en las últimas etapas de un ejercicio prolongado, cuando el glucógeno muscular y la glucemia son bajos.

El paso de glucosa a glucosa 6 fosfato (G6P) en la célula muscular es irreversible por lo que no puede salir de allí.

Durante el catabolismo de glucosa a piruvato en el citoplasma, el rendimiento energético neto equivale a la resíntesis de 6 moléculas de ATP, 2 ATP se forman en citosol (por glucólisis anaeróbica) y 4 ATP en la mitocondria por la reoxidación del NADH, si no se pudiera reoxidar el NADH por esta vía, el piruvato es capaz de hacerlo, reduciéndose a ACIDO LÁCTICO sin que sea necesaria la presencia de oxígeno.

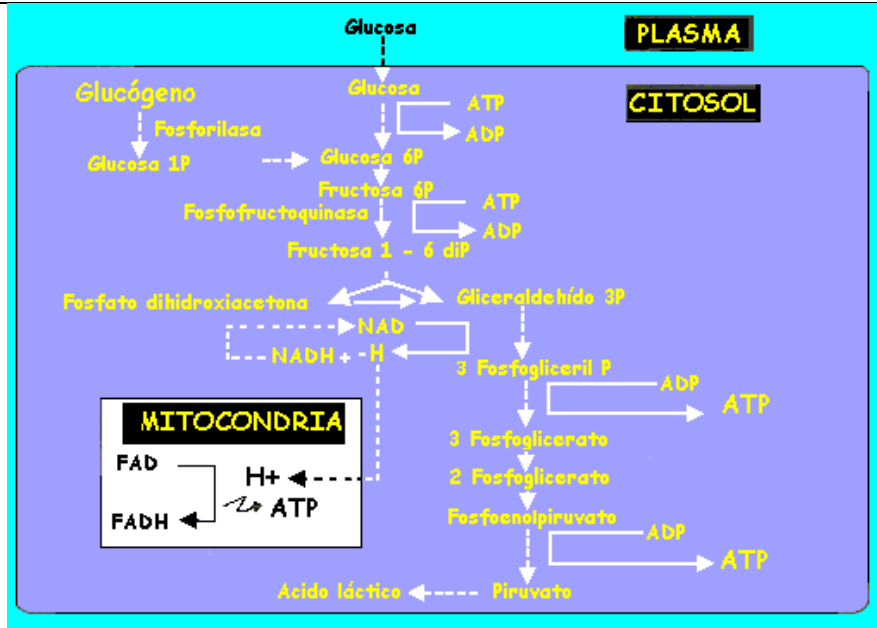


Entonces, a través de la glucólisis anaeróbica sólo se forman **2 moléculas de ATP y 2 moléculas de ácido láctico** que provocan estados de acidosis metabólica cuya consecuencia metabólica es la **FATIGA MUSCULAR**.

El ácido láctico se disocia totalmente al pH normal de la célula muscular dando lugar a lactato e iones hidrógenos.

Los hidrogeniones deben ser tamponados en la célula para mantener el estado ácido-base.

El bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) es el sistema más utilizado por lo que al unirse con un ion hidrógeno aumenta la producción de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante el ejercicio intenso.



Esquema general de la utilización anaeróbica de la glucosa por la célula muscular. Glucólisis

## 2) SISTEMA AEROBICO

Los hidratos de carbono, las grasas y en menor grado las proteínas pueden ser utilizados para la obtención de energía a través del ciclo de Krebs; dicha energía es mucho mayor que la que se obtiene por la vía de la glucólisis.

En el ciclo de Krebs se obtiene ATP y se forma CO<sub>2</sub> y hidrogeniones, cuyos electrones son transferidos a la cadena respiratoria mitocondrial, donde reaccionan con O<sub>2</sub> formando H<sub>2</sub>O y generando mayor cantidad de energía por el acoplamiento entre los fenómenos de oxidación y reducción.

### Hidratos de carbono (oxidación del piruvato)

El piruvato formado en la glucólisis al ingresar en la mitocondria es transformado en acetil Co-A por la piruvato deshidrogenasa, y así ingresa al ciclo de Krebs. La función más importante de éste ciclo es la de generar electrones para su paso por la cadena respiratoria en donde a través de la fosforilación oxidativa se resintetiza gran cantidad de ATP. La enzima limitante es la ISOCITRATO DESHIDROGENASA que es inhibida por el ATP y estimulada por el ADP. Además tanto el ADP como el ATP estimulan e inhiben, respectivamente, el transporte de la cadena de electrones

( Figura 3).

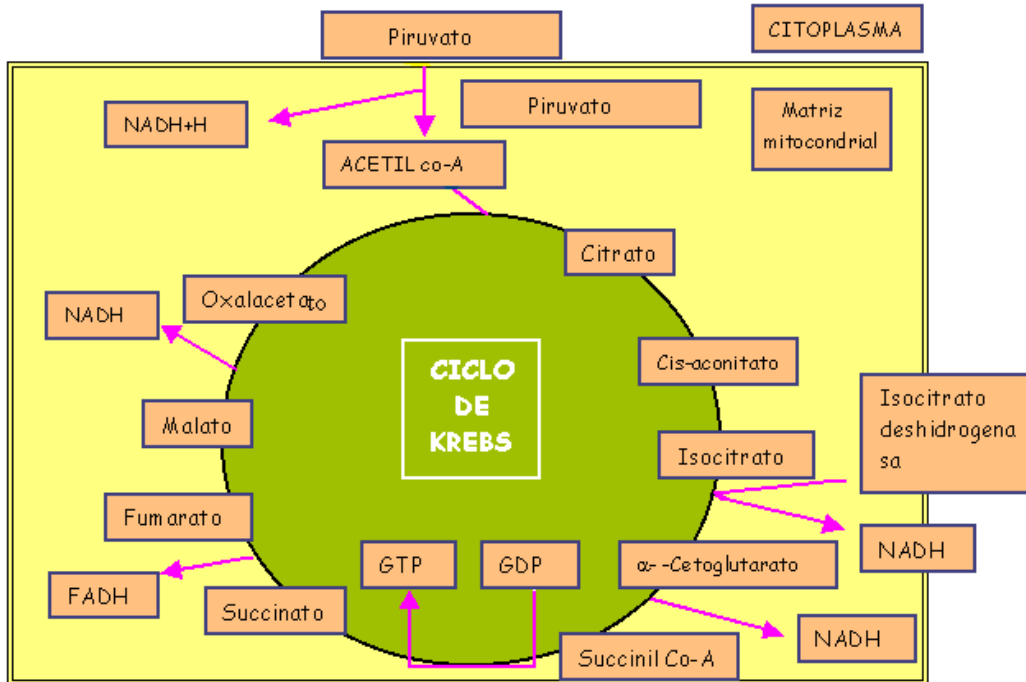


Figura 3

Como resultado de un entrenamiento físico de resistencia varias enzimas del ciclo y de la cadena respiratoria duplican su actividad, además de aumentar el número y tamaño de las mitocondrias.

El rendimiento energético neto de este metabolismo aeróbico es de 36 ATP frente a los 2 ATP que se obtienen en la glucólisis anaerobia. (Figura 4).

RENDIMIENTO ENERGETICO NETO	
<b>DE GLUCOSA CIRCULANTE</b>	
● Anaeróbico:	2 ATP (+ 2 lactatos)
● Aeróbico :	2 ATP + 2 NADH ( c ) + 8 NADH + 2 FAD + 2 GTP ( = 36 ATP )
<b>DE GLUCOGENO ALMACENADO</b>	
● Anaeróbico:	3 ATP (+ 2 lactatos)
● Aeróbico :	3 ATP + 2 NADH ( c ) + 8 NADH + 2 GTP ( = 37 ATP )
<b>Equivalentes energéticos</b>	
NADH	= 3 ATP
FADH	= 2 ATP
GTP	= 1 ADP
NADH (citosol)	= 2 ATP (bomba asparto - malato)

Figura 4. Cálculo del rendimiento energético neto que se obtiene utilizando la glucosa como combustible.

En las fases de reposo la glucosa se almacena en el organismo tras fosforilarse en forma de glucógeno a través de la glucógeno sintetasa (glucogenogénesis). Al realizar ejercicios es necesario la ruptura de este para obtener glucosa, proceso que recibe el nombre de glucógenolisis y que resintetiza 1 molécula de ATP, es por eso que el rendimiento energético neto es de 37 ATP.

Además de estos mecanismos se deben considerar la gluconeogénesis que es la síntesis de glucosa a partir de aminoácidos, glicerol y lactato; y la glucogénesis que es la síntesis de glucosa a partir del piruvato, de los cuales el primero puede llegar a representar durante el ejercicio hasta un 45% de la producción hepática de glucosa.

## LÍPIDOS

Son una fuente inagotable de energía durante el ejercicio y aumenta su utilización a medida que aumenta la duración del mismo. Su metabolismo es puramente aeróbico y al utilizarse como sustrato energético produce un ahorro de h. de carbono cuyo agotamiento se relaciona con la "fatiga muscular" en los ejercicios de larga duración.

Los triglicéridos de los adipocitos se rompen por la acción de la lipasa (*lipólisis*) en glicerol y ácidos grasos (AG), el primero actúa como precursor gluconeogénico mientras que los AG son transportados hasta la célula muscular en donde tras sufrir una serie de cambios en el citoplasma ingresan a la mitocondria gracias a un transportador, la carnitina, y allí se produce la beta-oxidación que da como resultado la formación de moléculas de acetil Co-A que ingresan al ciclo de Krebs con un rendimiento de 12 ATP cada una.(Figura 5).

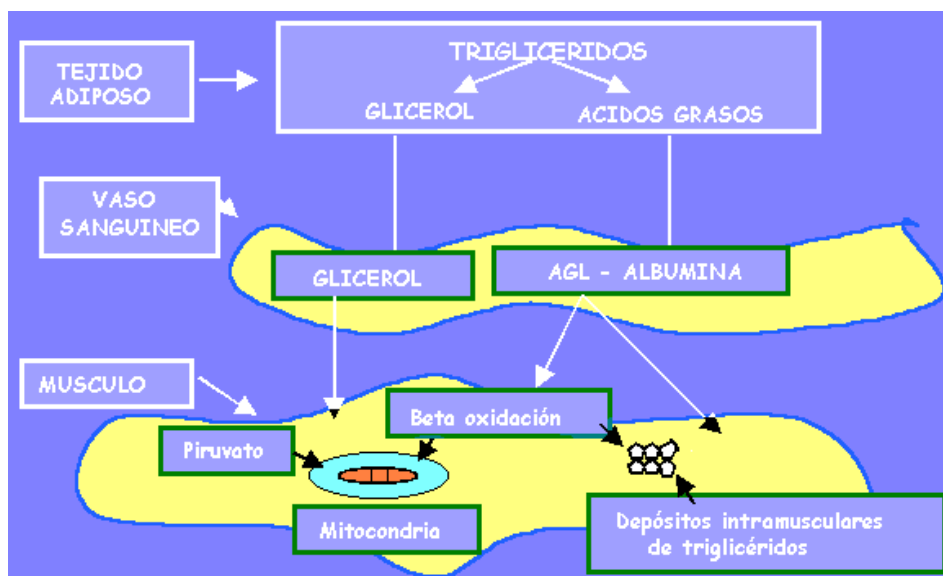


Figura 5. Movilización y utilización de los depósitos de grasa.

En el ejercicio hay un aumento de la actividad simpática adrenal y una disminución de insulina que estimulan los procesos de lipólisis.

El consumo de los AG depende de varios factores:

- 1) Flujo sanguíneo muscular (más importante)
- 2) Intensidad y duración del ejercicio
- 3) Grado de entrenamiento

4) Dieta

El entrenamiento de resistencia provoca:

- ☀ Aumento de la masa mitocondrial.
- ☀ Aumento de la actividad de la carnitina.
- ☀ Una mejora global de la entrada de los ácidos grasos a la matriz mitocondrial.

Al agotarse los depósitos de glucógeno, se forman a partir de los AG los cuerpos cetónicos que pueden ser utilizados como fuente de energía y se demostró que en los sujetos entrenados están aumentadas las enzimas implicadas en la utilización de las cetonas.

**PROTEÍNAS**

Aportan de un 4-15% de la energía total en los ejercicios de larga duración (mayores de 60 minutos). En éstos se ha demostrado un aumento en las concentraciones sanguíneas de los aminoácidos leucina y alanina que reflejan un aumento de los procesos proteolíticos a nivel hepático y muscular.

Los grupos NH<sub>2</sub> son convertidos en UREA mientras que sus carbonos estructurales son transformados en piruvato, acetil Co-A o en algunos de los intermediarios del ciclo de Krebs.

El ejercicio modifica 3 procesos importantes del metabolismo de las proteínas:

- 1) Aumenta la producción de amonio (NH<sub>4</sub>) a partir de la desaminación del ATP que ocurre cuando la tasa de producción del ATP supera a la de formación.
- 2) Aumento de la producción de urea en el hígado en los ejercicios de larga duración, que es eliminada por la orina.
- 3) Aumenta la oxidación de los aminoácidos con balance nitrogenado negativo, sobre todo los de cadena ramificada ( por ej. leucina) que son catabolizados en el músculo esquelético, sus carbonos se oxidan y los residuos nitrogenados participan en la formación de alanina que actúa como sustrato gluconeogénico en el hígado (ciclo de la alanina-glucosa).

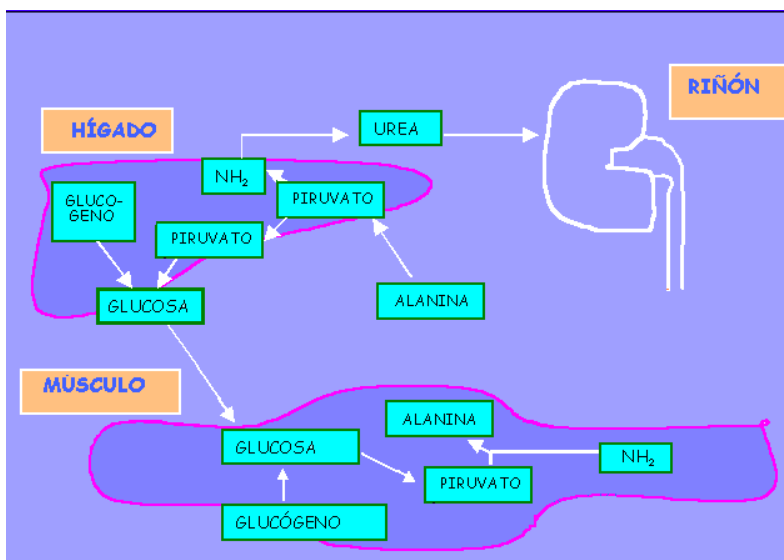







Fig. 6- Ciclo de la alanina

## ADAPTACIONES ORGANICAS EN EL EJERCICIO

Durante el ejercicio se producen modificaciones adecuadas y coordinadas en todo el organismo a nivel de los distintos sistemas funcionales. Ellos son:

-  Cardiocirculatorio
-  Respiratorio
-  Hematológico
-  Endocrino
-  Renal, entre otros.

## RESPUESTAS Y ADAPTACIONES CARDIOCIRCULATORIAS

En el ejercicio el sistema cardiovascular tiene 3 funciones:

- 1) Adaptar el flujo sanguíneo a los músculos activos.
- 2) Eliminar los productos de desecho.
- 3) Colaborar en los procesos de termorregulación.

La respuesta está regulada por diferentes mecanismos:




**NERVIOSOS:** se produce un aumento de la actividad nerviosa simpática y una disminución de la actividad parasimpática mediado por 2 controles:

**a) central:** son impulsos nerviosos descendientes de la corteza cerebral hacia el centro vasomotor del bulbo raquídeo. Este control se inicia simultáneamente con la orden motora de los músculos actuantes, es la llamada "respuesta anticipatoria".

**b) reflejo:** que se produce después que comienza la contracción muscular y son impulsos que se originan en receptores de músculos y articulaciones (ergorreceptores), éstos son de 2 tipos: mecanorreceptores (sensibles a los efectos mecánicos de la contracción); y metaborreceptores, que evalúan la eficacia del flujo de sangre en relación a el aumento de demanda metabólica. Estos impulsos son conducidos por fibras nerviosas tipo III y tipo IV respectivamente hasta el centro cardiorespiratorio. De forma colectiva, tanto los impulsos del comando central como los del reflejo periférico condicionan la respuesta simpática durante el esfuerzo.



Los efectos del SNS son:

### Sobre el corazón:


-  cronotrópico (+)
-  dromotrópico (+)
-  inotrópico (+).

Todo esto lleva a un aumento en la fracción de eyección y en el volumen sistólico que en definitiva producen un aumento del gasto cardíaco y de la presión arterial sistólica.

### Sobre los vasos sanguíneos:

-  vasoconstricción en los territorios inactivos
-  vasodilatación en los músculos activos.

**Humorales:** estos a la vez son de diferentes tipos:

 por el ejercicio se produce a nivel tisular un aumento de CO<sub>2</sub>, una disminución de la PaO<sub>2</sub> (presión arterial parcial de O<sub>2</sub>) y un descenso del pH que producen una vasodilatación arteriolar; son los denominados "**reflejos nutricios o de sensibilidad trófica**".



➔ además se producen una serie de metabolitos que permiten una **AUTORREGULACION LOCAL** de la presión sanguínea de perfusión, que son: aumento del potasio, ácido láctico, adenosina, histamina, prostaciclina, etc.

➔ por último se pone en marcha una regulación hormonal que incrementa la producción de catecolaminas, glucagón, PNA, S.R.A, Aldosterona y ADH.(Figura 7)

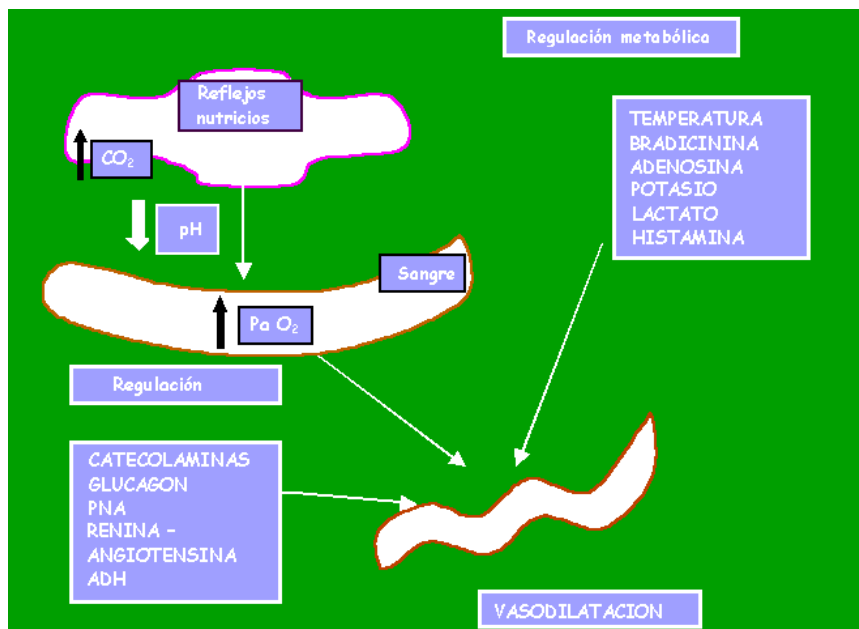


Fig. 7. Respuesta de vasodilatación regulada por mecanismos humorales

**RESPUESTA HIDRODINAMICA:** en el cual se produce un aumento del retorno venoso que es un factor decisivo en el aumento del gasto cardíaco en la actividad física al producir el llenado ventricular durante la diástole.

Este aumento del retorno venoso se produce por:

- 1) la venoconstricción producida por el SNS,
- 2) el bombeo activo de la sangre por la contracción muscular sobre todo de miembros inferiores,
- 3) acción de la bomba aspirativa torácica y,
- 4) el aumento de las resistencias vasculares periféricas a nivel de los territorios esplácnico, cutáneo, renal y músculos inactivos. Los vasos de la piel se contraen inicialmente pero si el ejercicio continúa se dilatan para eliminar el calor excesivo que se produce en la contracción muscular.

Los efectos del retorno venoso sobre el aparato cardiovascular son:

▶ Mayor distensión de la aurícula derecha que produce un aumento de la hiperexcitabilidad y un aumento de la frecuencia cardíaca automática (**REFLEJO DE BAIMBRIDGE**),

▶ Aumento de las fibras miocárdicas que llevan a un aumento de la fuerza de contracción, de la fracción de eyección, del volumen sistólico y del gasto cardíaco.

(**LEY DE FRANK STARLING**)( Figura 8)

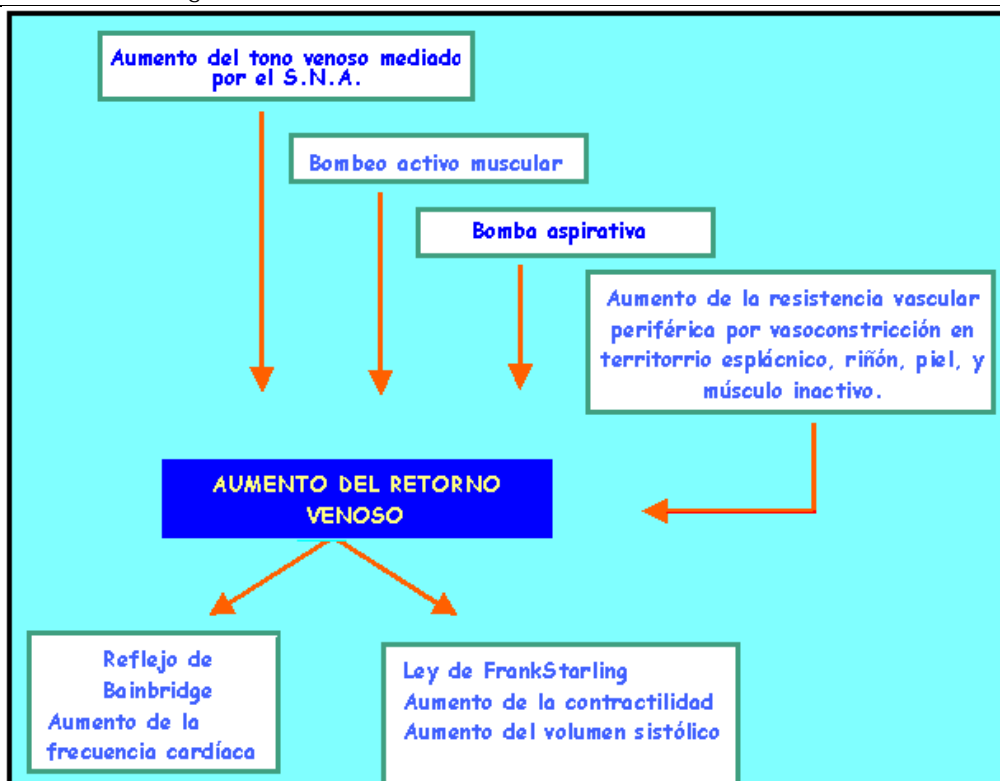


Fig. 8: Mecanismos reguladores de la respuesta hidrodinámica.

**GASTO CARDIACO.** Durante el ejercicio el aumento del gasto cardíaco se produce en forma lineal y directamente proporcional a la intensidad del trabajo realizado hasta llegar a una intensidad del 60-70% del consumo máximo de O<sub>2</sub> (VO<sub>2</sub> máx.), este es la cantidad máxima de O<sub>2</sub> que el organismo puede absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo (ml x kg x min). A partir de ese momento tiende a la estabilidad hasta llegar al 80-90% en donde puede incluso disminuir por la taquicardia excesiva que disminuye el llenado diastólico y por lo tanto el volumen sistólico. (Figura 9)

**EL VOLUMEN SISTOLICO** aumenta linealmente hasta 40-60% de la VO<sub>2</sub> máx., luego tiende a estabilizarse hasta llegar a 90% en donde disminuye por la taquicardia excesiva. Esto ocurriría en sujetos sedentarios o poco entrenados mientras que en individuos deportistas bien entrenados el volumen sistólico aumenta progresivamente hasta el máximo esfuerzo porque tienen aumentada la capacidad diastólica por una mayor distensibilidad del ventrículo izquierdo.

**La FRECUENCIA CARDIACA** aumenta linealmente con el esfuerzo. La misma depende además de diversos factores:

- edad:  $FC \text{ máx. teórica} = 220 - \text{edad en años}$
- grado de entrenamiento físico.
- tipo de ejercicio: en el estático aumenta exclusivamente mientras que en el dinámico lo hace junto con el volumen sistólico.
- temperatura y humedad del ambiente.
- presión atmosférica.

hora del día.

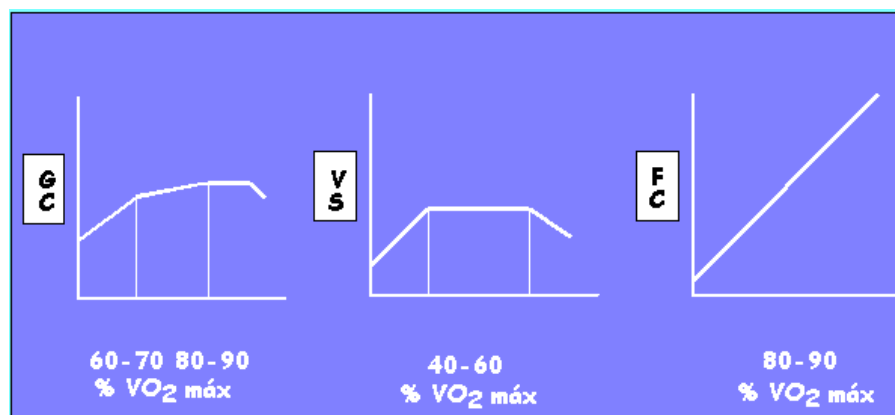


Figura 9: Respuesta del gasto cardíaco (GC), del volumen sistólico (VS) y de la frecuencia cardíaca (FC) durante la realización de un ejercicio de intensidad creciente.

Con respecto a la **PRESION ARTERIAL** podemos decir que la sistólica aumenta tanto en los ejercicios dinámicos como en los estáticos mientras la maniobra de Valsalva.

El aumento de la presión sistólica es mayor que el de la presión diastólica por lo que se constata un aumento de la presión diferencial.

Una vez finalizado el ejercicio existe un descenso rápido de la presión arterial como consecuencia de la disminución del gasto cardíaco, la vasodilatación y la disminución del retorno venoso por lo que no es aconsejable detener súbitamente el ejercicio lo que puede provocar: malestar, vértigo, lipotimia, etc.

El entrenamiento de resistencia tiende a reducir los valores de reposo de la tensión arterial, tanto sistólica como diastólica por lo que se lo utiliza como terapéutica de pacientes hipertensos.

Las adaptaciones inducidas por el entrenamiento son:

- ⊕ Hipertrofia cardíaca
- ⊕ Aumento del volumen sistólico
- ⊕ Bradicardia en reposo
- ⊕ Disminución de la velocidad de conducción.

## RESPUESTAS Y ADAPTACIONES RESPIRATORIAS

El sistema respiratorio en el ejercicio tiene 3 funciones básicas:

- 1) Oxigenar y disminuir la acidosis metabólica de la sangre venosa que está hipercápnica e hipoxémica.
- 2) Mantener baja la resistencia vascular pulmonar.
- 3) Reducir el paso de agua al espacio intersticial.

Se producen modificaciones a nivel de la ventilación pulmonar, difusión y transporte de gases.

## A) Ventilación pulmonar

Durante el ejercicio intenso la frecuencia respiratoria (FR) en personas sanas puede alcanzar 35-45 r.p.m. llegando hasta 60-70 r.p.m. en deportistas de alto nivel.

El volumen corriente puede llegar hasta los 2 litros.

La ventilación pulmonar puede alcanzar valores 17 veces mayores que en el reposo (100 L/min) y se modifica antes, durante y después del ejercicio. La misma tiene 3 fases:

**FASE I:** la ventilación aumenta en forma brusca. (duración: 30-50 seg.)

**FASE II:** el aumento se hace más gradual (3-4 min.)

**FASE III:** se estabiliza (solo en ejercicios de intensidad leve o moderada)(Figura 10).

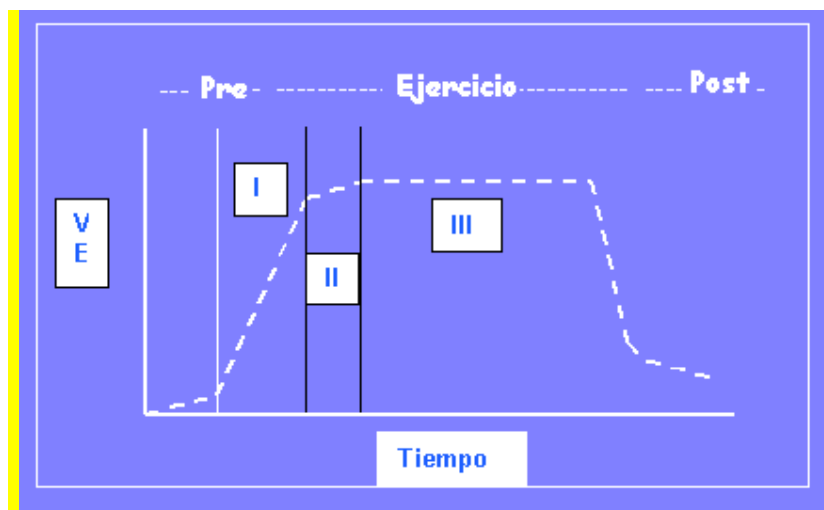


Figura 10: Respuesta ventilatoria al ejercicio de intensidad moderada.

Durante el ejercicio leve o moderado el volumen espirado (VE) aumenta en forma lineal con respecto al consumo de O<sub>2</sub> (VO<sub>2</sub>) y con la producción de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>) cuyo cociente VE/VO<sub>2</sub> es igual a 20-25.

Este aumento se debe a un aumento mayor del volumen corriente en comparación a la frecuencia respiratoria.

Cuando el ejercicio es muy intenso y se instala una acidosis metabólica la relación VE/VO<sub>2</sub> se hace curvilínea y el aumento de la VE es a expensas de la FR, al no alcanzarse la fase III se produce un aumento desproporcionado de la VE en relación al VO<sub>2</sub> por lo que su cociente puede llegar a 35-40.

El punto en el cual se produce esa respuesta desproporcionada se denomina **“umbral ventilatorio”** y corresponde aproximadamente al 55-65% de la VO<sub>2</sub> máx.

Durante la recuperación pos ejercicio se produce una primera fase de disminución brusca de la VE y otra fase de disminución gradual.

Con respecto a la V/Q podemos decir que en el ejercicio ligero se mantiene semejante al del reposo (0,8), en el moderado tanto la VE como la perfusión se hacen mucho más uniformes en todo el pulmón, hay un reclutamiento de los capilares pulmonares y un aumento del diámetro de los mismos.

Mientras que en el ejercicio intenso hay un aumento desproporcionado de la VE con el cual la relación V/Q puede aumentar hasta 5

## B) Difusión de gases

La capacidad de difusión del O<sub>2</sub> se triplica gracias al aumento de la superficie de intercambio.

En estado de reposo la PO<sub>2</sub> del capilar y del alvéolo se iguala en los primeros 0,25 seg. del

tránsito del eritrocito en contacto con la membrana alveolar que es de 0,75 seg. en total; en el ejercicio al aumentar el flujo sanguíneo el tiempo de tránsito disminuye a 0,50 ó 0,25 pero mientras no descienda más, la capacidad de difusión se mantiene.

## C) Transporte de gases en sangre

Durante el ejercicio la hemoglobina aumenta 5-10% debido a la pérdida de líquidos y al trasvase de los mismos desde el compartimiento vascular al muscular (hemoconcentración).

La diferencia arteriovenosa está aumentada debido a la mayor extracción de O<sub>2</sub> por parte de las células musculares activas.

El aumento de hidrogeniones, del CO<sub>2</sub>, de la temperatura y del 2,3 DPG desplazan la curva de disociación de la hemoglobina hacia la derecha.

La mioglobina que facilita el transporte de O<sub>2</sub> en el interior de la célula muscular hasta la mitocondria parece aumentar sus concentraciones gracias al entrenamiento de resistencia.

El transporte de CO<sub>2</sub> desde la célula hasta los pulmones se realiza principalmente por el sistema del bicarbonato.

## REGULACION DE LA VENTILACION

Los mecanismos responsables de la hiperventilación que se produce en el ejercicio son:

- 1) **Estímulo central:** Proviene del centro respiratorio y del hipotálamo.
- 2) **Potenciación a corto plazo:** Es un mecanismo no sensorial intrínseco que provoca una amplificación de la respuesta ventilatoria a cualquier estímulo. Se encuentra en las neuronas del tronco cerebral.
- 3) **Mecanismo de retroalimentación:** Integrado por dos grupos:
  - + **Retroalimentación respiratoria:** quimiorreceptores centrales, periféricos y receptores en músculos respiratorios, pulmones y vías aéreas.
  - + **Retroalimentación no respiratoria:** receptores en músculos, senos carotídeos, receptores venosos y cardíacos.
- 4) **Mecanismos termorregulatorios.**

De estos mecanismos regulatorios algunos predominan en una fase y otros en otra.

**FASE I:** Predominan el estímulo central potenciado por la retroalimentación muscular.

**FASE II:** A los dos anteriores se le suman la potenciación a corto plazo, la acción del potasio en los senos carotídeos y la de los gases sanguíneos.

**FASE III:** Actúan todos los mecanismos.

En la recuperación:

■ Fase rápida: representa la desaparición del comando central y de los mecanismos de retroalimentación muscular.

■ Fase lenta: representa la desaparición de la potenciación a corto plazo, manteniéndose el factor estimulador que es el aumento de potasio y los otros mecanismos que se van a ir ajustando hasta llegar al estado basal.

## RESPUESTAS Y ADAPTACIONES HEMATOLÓGICAS AL EJERCICIO

En general podemos decir que los deportistas que realizan una actividad física intensa y de larga duración (ciclistas, nadadores, corredores etc.) presentan aumentos del volumen plasmático, descenso del hematocrito y del recuento eritrocitario y concentraciones bajas de hemoglobina, hierro y ferritina.

### VOLUMEN SANGUÍNEO

#### Modificaciones del volumen sanguíneo:

■ Aumento del volumen plasmático (en personas entrenadas)

**causas:**

- aumento de aldosterona
- aumento de renina-angiotensina-aldosterona [retención de Na<sup>+</sup> y agua vasoconstricción]

■ Disminución del volumen plasmático: (en personas no entrenados)

**causas:**

- pérdida de líquidos por sudoración
- aumento de la presión hidrostática capilar por aumento de la TAM (tensión arterial media).

#### SERIE ROJA:

#### Modificaciones del volumen eritrocitario:

(observaciones contradictorias)

- Hematocrito aumentado en individuos entrenados (por aumento de la eritropoyetina) entre 16% a 18 %
- Hemoconcentración y aumento de hematocrito (hasta los 60 min después de la actividad física)
- Hemodilución (hasta 48hs después de un ejercicio normal) y normalización del hematocrito
- Hemólisis intravascular de los glóbulos rojos viejos (aumento de hemoglobina plasmática libre, bilirrubina total, potasio) en ejercicios intensos.
- Seudo anemia (reducción de la viscosidad sanguínea) o anemia dilucional
- Aumento del 2-3 DPG y desviación de la curva de disociación a la derecha.

#### Modificaciones de cationes: (en ejercicios intensos)

- Aumento del sodio

- Aumento del potasio  
[por disminución de la VFG y rhabdomiólisis]

## SERIE BLANCA

- aumento de glóbulos blancos

### Causas:

- Por demarginación (paso de leucocitos desde el "pool marginal")
- Por aumento de glucocorticoides
- Respuesta inflamatoria (por lesiones hísticas que generalmente aumentan los polimorfonucleares circulantes.

## PLAQUETAS:

- Aumento de plaquetas (depende de la intensidad del ejercicio)
- Por liberación del pool esplénico, de la médula ósea y lecho vascular pulmonar.
- Aumento de la agregación plaquetaria ( lesión endotelial por el aumento de flujo y turbulencia.

## COAGULACIÓN:

- Aumento de la coagulación (hasta 60 min luego del ejercicio)
- Aumento de factores VIII – IX – X – XII ( acortamiento del KPTT)
- Fibrinólisis aumentada (hasta 60 min luego del ejercicio)
- Aumenta hasta 10 veces su valor normal
- Hay aumento del activador tisular del plasminógeno (tPA)

## RESPUESTAS Y ADAPTACIONES RENALES AL EJERCICIO

### Modificaciones de la hemodinamia renal:

- Disminución del flujo sanguíneo renal
- Disminución del flujo plasmático renal  
[proporcional a la intensidad del ejercicio (30-75% del normal)]

#### Causas:

- Aumento de ADH
- Aumento de Renina y Angiotensina II
- Aumento de la actividad simpática

- Disminución del volumen de Filtrado Glomerular (hasta un 50%)

#### Causa:

- Vasoconstricción de la arteriola aferente y eferente

### Modificaciones del volumen de orina:

- Disminución del volumen urinario → ejercicio intenso (por aumento de ADH)
- Aumento del volumen urinario → ejercicio moderado (por eliminación de solutos)

### Otros:

- Hematuria
- Proteinuria  
[aumento de permeabilidad glomerular por hipoxia renal en ejercicios intensos]

## BIBLIOGRAFIA

1. Tresguerres JA. Fisiología Humana 2ª edición – 1999 . Editorial Interamericana
2. López Chicharro J, Fernández Vaquero A. Fisiología del ejercicio- 1995 – Editorial Panamericana
3. Ganong W. Fisiología Médica – 1998 – Edición Manual Moderno
4. Gingolani H, Houssay A . Fisiología Humana – 2000 (7ª edición) – Editorial El Ateneo –
5. Apuntes de la Cátedra de Medicina del Deporte – 2002-
6. Comroe JA. Fisiología de la respiración - 1983 – Editorial Interamericana