

PROCESOS DE RECUPERACION

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

I. INTRODUCCION

A. Importancia/Valor

1. Los procesos energéticos durante la recuperación:

Ayudan al reabastecimiento de las reservas energéticas, lo cual es de importancia para los ejercicios continuos e intermitentes.

2. Valor/utilidad de poseer conocimiento sobre los mecanismos envueltos en los procesos de recuperación:

Los atletas podrán recuperar de una manera rápida y completa entre una prueba y otra.

II. EL OXIGENO DE RECUPERACION (O₂ DE RECUPERACION), O EL CONSUMO DE OXIGENO EN EXCESO POS-EJERCICIO (COEP) (ANTIGUAMENTE CONOCIDO COMO: DEUDA DE OXIGENO) (Véase Figura 1)

A. Concepto

1. Definición:

- a. Representa aquella cantidad de oxígeno utilizado/consumido por los tejidos corporales durante el período de recuperación (pos-ejercicio) de un ejercicio liviano, moderado o agotador/intenso, el cual constituye un exceso del que normalmente se observa en un período de similar duración con el músculo en reposo.
- b. Aquel exceso en el consumo de oxígeno (sobre el nivel basal [reposo]) evidente durante el período de recuperación de un ejercicio.
- c. Aquel elevado consumo de oxígeno que sobrepasa a la cantidad requerida para mantener el cuerpo vivo durante el reposo (i.e., se mantiene sobre los niveles/valores normales en reposo).
- d. El retorno demorado del consumo de oxígeno a nivel basal que ocurre durante la recuperación del ejercicio.

B. Propósitos/Utilidad

1. Restaurar las reservas musculares de fosfágeno (ATP y PC).
2. El reabastecimiento de las reservas de oxígeno en la sangre y tejidos (i.e, en la mioglobina musculoesquelética, la oxihemoglobina venosa, y el oxígeno disuelto en los líquidos tisulares).
3. Reponer las reservas del glucógeno muscular y hepático.
4. Eliminar el ácido láctico de los músculos y la sangre.
5. Disminuir hacia los valores normales aquellas hormonas calorificas (que estimulan al metabolismo) (e.g., las catecolaminas, tiroxina, y glucocorticoides).
6. Retornar a niveles normales la frecuencia cardíaca, gasto cardíaco, y la función pulmonar.
7. La restauración del equilibrio de los iones/electrolitos (iones de sodio, potasio y calcio) en los compartimientos corporales (e.g., músculos esqueléticos).
8. Reparación de los tejidos.

C. Componente/Etapa Inicial o Rápido (Antes llamado "Alactácido") del Oxígeno de Recuperación

1. Concepto:

La porción inicial y rápida del O_2 de recuperación (o COEP).

2. Funciones:

a. Restaura las reservas de ATP y PC.

b. Repone las reservas de oxígeno agotadas durante el ejercicio:

Alrededor de 0.6 litros de oxígeno se utilizan luego de un ejercicio anaeróbico.

c. Mantiene activo al corazón y músculos respiratorios:

El corazón y músculos respiratorios requieren alrededor de 50 ml de oxígeno durante el período inicial o rápido del O_2 de recuperación.

d. Provee oxígeno a los tejidos en el cuerpo en general:

Cierta cantidad de oxígeno requieren las células del cuerpo para su metabolismo, lo cual resulta en un aumento en la temperatura corporal.

3. Características:

a. Se cancela (dura) de 3 a 5 minutos.

c. Se activa el sistema metabólico aeróbico para que pueda restaurar las reservas musculares de fosfágeno (ATP y PC)

b. El ácido láctico se encuentra rápidamente entrando y saliendo de la sangre inmediatamente después del ejercicio (Brooks, Fahey & Timothy, 1996).

4. Relación con el tipo de ejercicio (Intensidad):

Entre mayor sea el agotamiento de las reservas de ATP y PC durante el ejercicio, mayor será el requerimiento de oxígeno para las restauraciones pertinentes durante la recuperación.

5. Ventajas de tener un componente rápido grande del oxígeno de recuperación:

a. Aumenta la habilidad del atleta para sostener y generar movimientos explosivos (anaeróbicos).

1) ¿Porque?:

Aumenta las reservas de ATP-PC en el músculo que, como sabemos, es la fuente primaria de energía para deportes explosivos (hasta 30 segundos).

6. Restauración de las reservas musculares de fosfágeno:

a. Velocidad del reabastecimiento de fosfágeno:

1) Rápido:

La mayor parte del ATP y PC utilizado durante el ejercicio es devuelto a los músculos esqueléticos en un plazo de 2 a 3 minutos.

2) Período medio o semiperíodo para la reposición del fosfágeno (el tiempo requerido para reponer, durante la recuperación, la mitad del fosfágeno utilizado durante el ejercicio):

Se extiende entre 20 y 30 segundos.

3) La importancia de la reposición del fosfágeno durante un ejercicio intermitente (períodos de trabajo intenso alternados con períodos de descanso):

- a) Los períodos de descanso dan tiempo para una reposición por lo menos parcial de las reservas de fosfágeno, que luego se pueden utilizar durante períodos subsiguientes de trabajo o pruebas.
- b) A veces resulta importante disponer de los fosfágenos almacenados durante cada intervalo de trabajo para prevenir o demorar la fatiga debido a la acumulación de ácido láctico.

b. Energética de la reposición de fosfágeno (véase Figura 2):

1) Sistema de oxígeno (metabolismo aeróbico):

La energía requerida para la restauración de las reservas de ATP y PC en los músculos proviene en su mayor parte del sistema de oxígeno, mediante la descomposición de los carbohidratos y las grasas.

2) Sistema del ácido láctico (glucólisis anaeróbica):

Una pequeña parte la energía dirigida hacia la reposición de los fosfágenos la provee el metabolismo anaeróbico.

3) Reposición directa del ATP:

Una parte del ATP sintetizado se repone directamente en los músculos esqueléticos por el sistema del oxígeno y, posiblemente por el sistema del ácido láctico (glucólisis anaeróbica).

4) Reposición indirecta de la fosfocreatina (PC):

La fosfocreatina se sintetiza mediante la energía que libera parte del ATP degradado en los músculos durante la recuperación.

7. Reabastecimiento de la mioglobina con oxígeno:

a. La mioglobina o hemoglobina muscular:

1) Concepto:

Es una proteína compleja (similar a la hemoglobina que se encuentra en los globulos rojos de la sangre) que se halla en los músculos esqueléticos (o estriados).

2) Ubicación específica en los músculos esqueléticos:

Se encuentra en mayores cantidades en las *fibras musculares de contracción lenta (CL)*, lo cual es uno de los motivos del mayor potencial aeróbico de estas fibras y del matiz rojo que poseen.

3) Funciones:

a) Enlaza (almacena) el oxígeno en los músculos esqueléticos.

b) Facilita el transporte (difusión) del oxígeno al interior de la célula muscular.

b. Papel de la mioglobina durante el ejercicio:

1) Fuente rápida de oxígeno para los músculos:

a) Fases iniciales de un ejercicio prolongado:

Durante los primeros minutos de un ejercicio, antes de que el sistema de transporte de oxígeno (respiración y circulación) pueda proveer oxígeno adicional, se consume el oxígeno unido a la mioglobina, lo cual contribuye a demorar la acumulación del ácido láctico en los músculos esqueléticos y la sangre.

b) Ejercicios intermitentes:

Durante ejercicios intermitentes, el oxígeno enlazado a la mioglobina puede ser restituido rápidamente durante los períodos de reposo y utilizado nuevamente durante subsiguientes períodos de trabajo.

2) Facilita la difusión del oxígeno de la sangre (capilares) hacia las mitocondrias en el seno de las fibras musculares.

c. Magnitud de las reservas de O₂-mioglobina:

1) Cantidad de oxígeno almacenado por la mioglobina:

Aproximadamente 11.2 mililitros (ml) de oxígeno se almacena con la mioglobina por kilogramo (kg) de la masa muscular.

d. Velocidad del reabastecimiento de las reservas de O₂-mioglobina:

1) Rápida:

Las reservas de oxígeno-mioglobina son abastecidas en un plazo de 1 a 2 minutos.

e. Mecanismo/energética para la restauración de las reservas O₂-mioglobina:

Durante el período de recuperación, aumenta la presión parcial de oxígeno (ésta depende de la concentración de oxígeno en el aire y de la presión barométrica o atmosférica) en el interior de la fibra muscular en que se almacena la mioglobina, lo cual origina una rápida recarga de la mioglobina con oxígeno.

D. Componente/Etapa Lenta (Antes llamado "Lactácido") del Oxígeno de Recuperación

1. Concepto:

La porción lenta del O₂ de recuperación.

2. Funciones:

- a. Restaura las reservas musculares y hepáticas de glucógeno.
- b. Se encarga de eliminar el ácido láctico de los músculos y la sangre.

3. Características:

- a. Se cancela (o dura) en un plazo de 30 minutos a 1 hora.
- b. Ocurre en la presencia de ácido láctico:

Es importante enfatizar que este componente lento del O₂ de recuperación no se encuentra cuantitativamente relacionado con la eliminación del ácido láctico. Existen otros mecanismos fisiológicos que inducen a un aumento en el consumo de oxígeno durante esta fase lenta de recuperación (Brooks, Fahey & Timothy, 1996, p. 179; Fox, Bowers & Foss, 1993, p. 46).

4. Restauración de las reservas musculares de glucógeno:

- a. Factores que afectan la velocidad y la cantidad de la reposición del glucógeno muscular.

1) Tipo de ejercicio que agotó las reservas de glucógeno (la intensidad y duración del ejercicio realizado):

- a) Ejercicios contínuos o de tolerancia (de baja intensidad y larga duración).
- b) Ejercicios intermitentes agotadores (de alta intensidad y corta duración).

2) La dieta (la cantidad de carbohidratos consumidos durante el período de recuperación):

- a) Dieta alta en carbohidratos.
- b) Dieta rica en grasas y proteínas.
- c) Ayuno (sin consumo de alimentos).

b. Efectos de la dieta y de la intensidad y duración del ejercicio:

1) Ejercicios prolongados o de tolerancia:

- a) Sólo se repone una cantidad insignificante de glucógeno muscular durante el período de recuperación (1 a 2 horas) que le sigue inmediatamente al ejercicio de tolerancia.
- b) La reposición completa del glucógeno muscular luego de un ejercicio de tolerancia requiere una dieta rica en carbohidratos durante un período de recuperación de 2 días (± 46 horas).
- c) Si no se ingieren carbohidratos a través de la dieta, sólo se repone una pequeña cantidad de glucógeno muscular, incluso después de 5 días.
- d) La restauración del glucógeno muscular luego de una dieta rica en carbohidratos es sumamente rápida durante las primeras horas de recuperación después de un ejercicio de tolerancia, con una reposición del 60% de las reservas en las primeras 10 horas de recuperación.
- e) Varios días de entrenamiento de tolerancia (e.g., correr 10 millas tres días consecutivos) pueden reducir las reservas de glucógeno a niveles muy bajos, aun con una ingestión dietética de carbohidratos, lo cual podrá originar un agotamiento crónico.

2) Ejercicios breves e intermitentes:

- a) Se puede resintetizar una cantidad significativa de glucógeno en un plazo de 30 minutos a 2 horas de recuperación en ausencia de ingestión de alimentos (carbohidratos).
- b) Una reposición completa del glucógeno muscular después de un ejercicio intermitente no requiere una dieta de carbohidratos superior a la normal.

- c) Con una dieta normal o rica en carbohidratos, una reposición completa del glucógeno muscular requiere 24 horas.
 - d) La reposición del glucógeno muscular es muy rápida durante las primeras horas de recuperación, con una reposición de 39% en 2 horas y 53% en 5 horas.
- c. Factores fisiológicos que influyen en las diferencias para el reabastecimiento del glucógeno muscular:

1) La cantidad total de glucógeno agotado durante el ejercicio:

- a) Ejercicios prolongados vs. intermitentes:

Durante un ejercicio continuo, alrededor del doble del glucógeno se agota, en comparación con el ejercicio intermitente; por lo tanto, puesto que menos glucógeno se agota en los ejercicios intermitentes, menos tiempo se requiere para su reposición.

2) La disponibilidad de los precursores de glucógeno:

Para poder sintetizar el glucógeno (así como cualquier otro compuesto), deben haber disponible cantidades adecuadas de sus constituyentes (precursores), tales como ácido láctico, ácido pirúvico y glucosa. Estos precursores deben estar disponibles al hígado y músculo esquelético donde ocurre la mayor parte de la resíntesis del glucógeno. Debido a que después de un ejercicio intermitente las concentraciones de estos precursores son normales o superiores (ocurriendo lo contrario en ejercicios prolongados), se pueden reabastecer las reservas de glucógeno en forma significativa (y en forma más rápida) en ausencia de la ingesta de carbohidratos después del ejercicio intermitente, pero no después de un ejercicio prolongado. Esto explica porqué se requiere una ingesta de carbohidratos luego de un ejercicio prolongado y porqué una ingesta de carbohidratos mayor de lo normal no acelera la reposición del glucógeno luego de un ejercicio intermitente.

3) El tipo de fibra muscular que se encuentra en el músculo esquelético:

Debido a que en los ejercicios prolongados de baja intensidad participan preferiblemente *fibras de contracción lenta (CL)* y en los ejercicios de corta duración y alta intensidad (tales como los ejercicios intermitentes) se reclutan con preferencia las *fibras de contracción rápida (CR)*, la reposición del glucógeno en las fibras *CR* es más veloz que las fibras *CL*.

d. Energética para la restauración del glucógeno muscular:

La energía del ATP para la reposición del glucógeno muscular durante el período de recuperación inmediato del ejercicio (1 a 2 horas) proviene del sistema de oxígeno (aeróbico), pero no envuelve en forma significativa el oxígeno consumido durante el componente lento del O₂ de recuperación, ya que para el tiempo en que se repone el glucógeno muscular (período de 1 - 2 horas de recuperación) se ha cancelado la fase lenta del O₂ de recuperación.

e. Carga de glucógeno muscular (sobrecompensación):

Se pueden duplicar las reservas musculares de glucógeno si después de una reducción del mismo inducida por el ejercicio se consume durante 3 días una dieta alta en carbohidratos (particularmente *complejos* o *almidones*).

f. Papel del ácido láctico en la reposición del glucógeno muscular:

Durante la etapa inicial de recuperación (primeros 30 minutos), el componente de lento del O₂ de recuperación suministra la energía necesaria para reconvertir el ácido láctico (subproducto de la descomposición anaeróbica del glucógeno) en glucógeno.

g. Recomendaciones a seguir para promover una recuperación adecuada y rápida de las reservas de glucógeno:

- 1) Se deben conceder varios días e insistir en una dieta rica en carbohidratos para una recuperación completa de las reservas de glucógeno en sus atletas dedicados a pruebas de tolerancia. Si no es posible conceder varios días, se deben otorgar por lo menos 10 horas.
- 2) Para los atletas no dedicados a las pruebas de tolerancia, un solo día y una cantidad normal de carbohidratos dietéticos deberían ser suficientes para una plena recuperación del glucógeno muscular después de un ejercicio intermitente de alta intensidad. Si no fuera posible, se les debe conceder por lo menos 5 horas.
- 3) En caso de ejercicios intermitentes, se puede esperar una cierta resíntesis del glucógeno durante las primeras 2 horas de recuperación (se producirá una parte en apenas 30 minutos) aún en ausencia de una ingestión de alimentos, lo cual debe contribuir a demorar un agotamiento progresivo del glucógeno por pruebas repetidas durante un período breve.

5. Restauración de las reservas hepáticas (del hígado):

a. Aspectos de relevancia:

- 1) Las reservas hepáticas de glucógeno se reducen considerablemente luego de un ejercicio prolongado.
- 2) La reducción de las reservas hepáticas luego de un ejercicio prolongado se acetúa con una ayuna de varios días.
- 3) Con una ayuna durante las primeras 24 horas de recuperación luego del ejercicio, no se lleva a cabo ninguna reposición del glucógeno hepático.

6. Eliminación del ácido láctico de los músculos y la sangre:

a. Velocidad/tiempo tomado para la eliminación del ácido láctico:

1) Semiperíodo para la eliminación del ácido láctico:

- a) Durante el reposo-recuperación (enfriar o recuperar descansando sentado o acostado):

25 minutos.

- b) Durante el ejercicio-recuperación (enfriar o recuperar efectuando un ejercicio liviano):

11 minutos.

2) Tiempo tomado para la eliminación completa del ácido láctico:

- a) Durante el reposo-recuperación:

1 a 2 horas.

- b) Durante el ejercicio-recuperación:

30 minutos a 1 hora.

b. Efectos del ejercicio durante la recuperación (ejercicio-recuperación) sobre la eliminación del ácido láctico:

1) Tipo de ejercicio efectuado durante la recuperación:

Se ha demostrado que después de un ejercicio agotador es posible eliminar con mayor rapidez el ácido láctico de la sangre si se realizan ejercicios continuos livianos durante la recuperación, tales como caminar o trotar a un paso lento, en comparación cuando se realizan ejercicios intermitentes.

2) Intensidad del ejercicio durante la recuperación:

Investigaciones científicas han encontrado que la eliminación del ácido láctico de los músculos y la sangre es más rápida cuando se realiza un ejercicio de baja intensidad, es decir, que equivale de 30 a 65% del consumo de oxígeno máximo ($VO_{2\text{máx}}$).

c. Destino del ácido láctico (fisiología de la eliminación del ácido láctico) - véase Figura 3 - :

1) ¿Que ocurre con el ácido láctico?:

a) Excretado a través de la orina y sudor:

La cantidad del ácido láctico eliminado a través de esta vía durante el período de recuperación es muy poco.

b) Conversión a glucosa y/o glucógeno:

Puesto que el ácido láctico es un subproducto de la degradación de los carbohidratos (glucosa y glucógeno), puede ser reconvertido a cualquiera de estos compuestos en el hígado (glucógeno y glucosa) y en el músculo esquelético (glucógeno), dado la energía requerida del ATP. Sin embargo, esta vía contribuye en forma mínima para la eliminación total del ácido láctico.

c) Conversión a proteína:

Los carbohidratos, incluyendo el ácido láctico, puede ser químicamente convertido en proteína dentro del cuerpo. Sin embargo, una vez más, solamente una pequeña cantidad es convertido a proteína durante el período inmediato de ejercicio-recuperación.

d) Oxidación/conversión a CO₂ y H₂O:

Se puede utilizar el ácido láctico como combustible metabólico, suministrando su descomposición aeróbica una cierta energía para la formación de ATP (mediante reacciones acopladas), principalmente en los músculos esqueléticos, pero también en los tejidos cardíacos, hepáticos, renales y cerebrales. En presencia de oxígeno, el ácido láctico se convierte (oxida) primero en ácido pirúvico y luego en CO₂ y H₂O en el ciclo de Krebs y en el sistema de transporte electrónico, respectivamente. Esta vía constituye el principal vehículo para la eliminación total de ácido láctico.

Tabla 1

**TIEMPOS RECOMENDADOS DE RECUPERACION
DESPUES DE UN EJERCICIO EXHAUSTIVO**

Proceso de Recuperación	Tiempo Recomendado de Recuperación	
	Mínimo	Máximo
Restauración del fosfágeno muscular (ATP y PC)	2 minutos	3 minutos
Cancelación del oxígeno de recuperación alactácido	3 minutos	5 minutos
Restauración de la O ₂ -mioglobina	1 minuto	2 minutos
Restauración del glucógeno muscular	10 horas	46 horas (después de un ejercicio prolongado)
	5 horas	24 horas (después de un ejercicio intermitente)
Eliminación del ácido láctico de los músculos y la sangre	30 minutos	1 hora (ejercicio-recuperación)
	1 hora	2 horas (reposo-recuperación)
Cancelación del oxígeno de recuperación lactácido	30 minutos	1 hora

Fuente: Fox, Edward L., Richard W. Bowers y Merle L. Foss. *Sports Physiology*. 3da. ed.; Wisconsin: WCB Brown & Benchmark Publishers, 1992. p. 98.

2) ¿Porqué la eliminación del ácido láctico es más rápida durante el período de ejercicio-recuperación?:

En las *fibras de contracción lenta (CL)* es donde se oxida la mayor parte del ácido láctico, ya que durante el período de ejercicio-recuperación aumenta el flujo sanguíneo que transporta el ácido láctico hacia las fibras *CL* y aumenta también la tasa metabólica en dichas fibras. Esto facilita la oxidación del ácido láctico a CO₂ Y H₂O. Además, el tipo de ejercicio utilizado (trote lento) durante el período de ejercicio-recuperación recluta preferiblemente las fibras *CL* para ejecutar dicho ejercicio, durante el cual la energía proviene de la degradación del ATP que se forma con la ayuda de la oxidación del ácido láctico. Estas son las principales razones porqué la eliminación del ácido láctico es más rápido durante el período de ejercicio-recuperación que durante el de reposo-recuperación.

III. 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. pp. 299-325.
2. Brooks, George A., Thomas D. Fahey y Timothy P. White. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and its Applications*. 2da. ed.; California: Mayfield Publishing Company, 1996. pp. 177-186.
3. De Vries, Herbert A. *Physiology of Exercise: for Physical Education and Athletics*. 4ta. ed.; Dubuque, Iowa: Wm. C. Brown Publishers, 1986. pp. 219-224.
4. Fox, Edward L., Richard W. Bowers y Merle L. Foss. *The Physiological Basis for Exercise and Sport*. 5ta. ed.; Wisconsin: WCB Brown & Benchmark Publishers, 1993. pp. 42-63, 681, 688, 690-691.
5. Fox, Edward L., Richard W. Bowers y Merle L. Foss. *Sports Physiology*. 3da. ed.; Wisconsin: WCB Brown & Benchmark Publishers, 1992. pp. 76-101.
6. Lamb, David R. *Physiology of Exercise: Responses & Adaptations*. 2da.ed.; New York: Macmillan Publishing Company, 1984. pp. 103-107, 465, 471, 473.
7. McArdle, William D., Frank I. Katch y Victor L. Katch. *Exercise Physiology: Energy, Nutrition, and Human Performance*. 4ta. ed.; Baltimore: Williams & Wilkins, 1996. pp. 130-135.
8. Shephard, Roy J. *Physiology & Biochemistry of Exercise*. New York: Praeger Publishers, 1982. pp. 22-31, 56-57, 354-356.