

Bioenergética Aplicada (I)

(Prof. GABRIEL MOLNAR)

FISIOLOGIA DEL EJERCICIO

Fuentes de energía

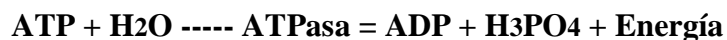
El Trifosfato de Adenosina (ATP)

La energía de las moléculas orgánicas, es transformada por las células en energía química contenida en el ATP. El ATP es el transportador energético de los procesos celulares, que necesitan aportes energéticos.

- El ATP está formado básicamente por una Adenina y una Ribosa que conforman la Adenosina. Y junto con ésta se agrupan 3 grupos fosfato.
- El ATP o La Adenosina Trifosfato, "es masculino": es un nucleótido. (Base nitrogenada más un azúcar = nucleósido y 3 unidades fosfato = nucleótido)
- El ATP se puede hidrolizar a ADP y fosfato inorgánico (Pi) o a AMP y pirofosfato (PPi).
- El enlace del primer grupo fosfato con la adenosina es de baja energía, pero los otros 2 enlaces fosfato se denominan, "Enlaces Fosfato de Alta Energía".
- Tanto el ATP como el ADP (Difosfato de Adenosina) son aniones muy cargados (ATP 4- y ADP 3-), por lo que poseen gran afinidad por cationes divalentes como el Mg²⁺.

La forma activa del ATP es a través del complejo ATP-Mg.

- En la elevada electronegatividad de los Enlaces Fosfato de Alta Energía y su proximidad, encontramos una de las razones del alto potencial energético de los mismos
- El desdoblamiento del ATP es un proceso de hidrólisis enzimática, esto es la necesidad de una enzima que catalice la reacción y la presencia de Agua junto con el complejo ATP-Mg.
- A partir de la hidrólisis del ATP se forma ADP y Acido fosfórico, liberando una importante cantidad de energía (aprox. 7 kcal/mol)



El ATP es el único Fosfato de Alta Energía que se forma primariamente de la ganancia energética de la célula a través de los procesos oxidativos (aeróbicos) o de la glucólisis (aeróbica o anaeróbica)

Al igual que una batería eléctrica, que contiene una cantidad muy limitada de energía y necesita una recarga continua, el ATP necesita de un proceso de resíntesis.

El ATP como vehículo universal de energía química, al igual que una batería, luego de desdoblarse en ADP y Fosfato, se encuentra «descargado», por esta razón necesita ser resintetizado.

Las reservas de ATP a nivel muscular son muy escasas (4 - 6 mMol por kg.), lo que determina teóricamente que una contracción muscular máxima lo agotaría en un par de segundos. Esto nos indica que la molécula de ATP debe ser resintetizada al mismo tiempo que se desdobla o degrada. Esto se refleja en el hecho que incluso en el más extenuante de los ejercicios, el nivel de ATP tiende a mantenerse constante.

Enzimas y Metabolismo energético

Las enzimas son biocatalizadores altamente específicos (sustrato específicos), están formadas por una base proteica (apoenzima) y una coenzima de base vitamínica, las cuales juntas (holoenzima) son capaces de producir la aceleración de la reacción respectiva, hasta alcanzar una situación de equilibrio.

El complejo enzima-sustrato es el representante del estado activado, un modo que tienen las enzimas para activar al sustrato es unirse a él, esto podría representarse de la siguiente manera: "Antes sin mi ayuda necesitabas una energía mayor que la que tienes ahora, que estamos unidos, ya que has alcanzado una nueva energía libre de activación necesaria para reaccionar y convertirte en producto, te dejo. Adiós." Ese adiós refleja la brevedad del encuentro.

Para acelerar una reacción se debe por lo tanto reducir la energía de activación. Las enzimas no se consumen en las reacciones, por lo que puede hablarse de conexión y desconexión de las reacciones. De esta manera ejercen un proceso de control sobre los procesos celulares.

Son selectivas en función al sustrato que elige y respecto a la reacción que cataliza. Por esta razón el descenso de algunas vitaminas reduce el rendimiento metabólico.

Las enzimas disminuyen la energía de activación del complejo activado, es como si la enzima hubiera creado un nuevo camino, más corto, para que la reacción tenga lugar.

Las **enzimas glucolíticas** están localizadas en el citoplasma, cerca de los filamentos contráctiles. Por tanto, el ATP producido por la vía glucolítica se forma cerca del lugar en que se usa. Parte de la reserva muscular de ATP y de fosfocreatina está también muy próxima a los filamentos contráctiles.

Otras tres vías metabólicas importantes del metabolismo energético muscular (betaoxidación de los ácidos grasos, ciclo del ácido cítrico y cadena respiratoria) son, a diferencia de la glucólisis, estrictamente aeróbicas. La mayoría de las enzimas del metabolismo aeróbico están localizadas en un sistema celular específico, la red mitocondrial.

Las **enzimas de la betaoxidación de los ácidos grasos** están dispuestas en el espacio interior de la mitocondria (la matriz), mientras que muchas enzimas del ciclo del ácido cítrico y componentes de la cadena respiratoria están situados sobre la pared mitocondrial interna. Así, los sustratos para las vías aeróbicas, como los ácidos grasos y el piruvato, deben ser transportados hasta la mitocondria desde el citoplasma e, inversamente, el ATP producido en los procesos aeróbicos debe ser transportado desde la mitocondria hasta el punto citoplasmático de uso. Ésta es una razón por la que la potencia máxima es menor en las vías aeróbicas que en la glucólisis anaeróbica.

Oxidación-reducción

Las reacciones de oxidación y reducción ocupan una posición central en el metabolismo celular. Químicamente, la oxidación se define como una liberación de electrones. La reducción es su contrapartida, es decir, una captación de electrones. El reactante que recibe electrones en una reacción química específica se reducirá y, a la inversa, el reactante que cede electrones se oxidará. En muchas reacciones de oxidación-reducción (redox), los electrones son liberados o incorporados mediante átomos de hidrógeno (un protón con un electrón asociado) o iones hidruro (un protón con un par de electrones asociado). Por tanto, el término deshidrogenación se usa como sinónimo de oxidación. La sustancia celular central de las reacciones redox es el compuesto (co-enzima) NAD⁺, dinucleótido de nicotinamida y adenina. El flujo de electrones a través de la cadena respiratoria representa la fuente de energía más importante del cuerpo al producir ATP (tres moléculas de ATP por molécula de NADH).

Regulación metabólica

Las variaciones de la intensidad del trabajo muscular determinan variaciones directamente proporcionales del consumo de ATP. Si no hubiera mecanismos de resíntesis la concentración de ATP disminuiría proporcionalmente con la intensidad del esfuerzo, provocando la disminución de la tensión muscular.

Cuando las reservas de ATP disminuyen entre un 30 y un 50%, se produce la incapacidad de continuar con la contracción muscular. A diferencia de lo que sucede con un automóvil, que es capaz de mantener su rendimiento hasta la última gota de combustible, y recién en ese momento su rendimiento cae abruptamente.

Por lo tanto será muy importante y determinante de las posibilidades de intensidad del trabajo muscular: la velocidad de resíntesis del ATP.

Siempre al inicio de un ejercicio hay un **déficit oxidativo**, que debe ser compensado por el aprovisionamiento energético de las vías anaeróbicas, generándose una deuda de oxígeno, la cual se restaurará (aproximadamente en un 95%) en 3 veces el tiempo de carga. El tiempo de adaptación es variable y oscila entre 30" y 3 minutos.

Los elementos que limitan esta velocidad de oxidación se encuentran en la difusión de las membranas mitocondriales.

El **lactato** es uno de los responsables más importantes del descenso del pH, pero el CO₂, producto de la oxidación aeróbica se comporta como un compuesto levemente ácido. Es trascendente la capacidad de trabajar en estados estables de lactato para aumentar el poder de oxidación del mismo y el rendimiento oxidativo. (oxidación a la misma velocidad de producción)

Vías de Resíntesis del ATP

El ciclo de desdoblamiento y resíntesis depende de 3 vías metabólicas, clasificadas en función de 2 criterios, la presencia o no del oxígeno dentro de los procesos de resíntesis y la producción o no del ácido láctico:

- **Anaeróbica aláctica (o del ATP - PC)**
- **Anaeróbica láctica (o glucolítica anaeróbica)**
- **Aeróbica (u Oxidativa)**

Bioenergética Aplicada (II)

FISIOLOGIA DEL EJERCICIO

Metabolismo Aeróbico

Características del metabolismo aeróbico

- **Sustratos:** Hidratos de carbono, Lípidos y Proteínas (mínimo)
- **Inercia:** entre 1 y 4 min. El sistema presenta una latencia para su más eficiente funcionamiento de hasta 4 min.
- **Potencia:** Comparativamente baja (VO_2)
- **Mantenimiento de la Potencia:** muy variable, de 2 a 20 minutos.
- **Capacidad:** Muy elevada, depende del % del VO_2 utilizado, de las reservas de los sustratos y de la temperatura.
- **Mantenimiento de la capacidad:** depende del % del VO_2 utilizado, pero es teóricamente ilimitada.
- **Lugar de producción:** En la mitocondria (Intramitocondrial)
- **Producto final:** H_2O y CO_2 .
- **Factores limitantes:** las posibilidades del sistema de transporte de O_2 , las reservas de Glucógeno y la hipertermia.
- **Restauración:** En el caso del agotamiento del Glucógeno, la reconstitución de los sustratos con una dieta hidratocarbonada lleva entre 24 y 48 hs.

Relación de la duración de las cargas y la Actividad Metabólica

• Cargas Máximas de hasta 8 segundos.

Anaeróbico aláctico masivo y dominante (muy prevalente) con leve participación de anaeróbica láctica (unitaria).

Entrenamiento de la velocidad y de la potencia o fuerza explosiva.

• Cargas Máximas de 8 a 25 segundos.

Anaeróbico aláctico dominante (prevalente) con participación anaeróbica láctica.

Entrenamiento de la velocidad, de la capacidad anaeróbica aláctica y de la potencia láctica.

• Cargas Máximas de 25 a 90 segundos.

Anaeróbico láctico dominante (prevalente) con participación anaeróbica aláctica.

Entrenamiento de la potencia y de la capacidad láctica.

• Cargas Máximas y Submáximas Intensas de 90 a 180 seg.

Anaeróbico láctico prevalente con participación aeróbica. Entrenamiento de la capacidad láctica y la potencia aeróbica.

• Cargas Máximas y Submáximas de más de 3 minutos.

Aeróbicas prevalentes.

Entrenamiento de la potencia y capacidad aeróbica.

Este esquema cumple estrictamente un rol didáctico, con la intención de facilitar la comprensión de la participación de las distintas vías de resíntesis del ATP durante el ejercicio. De ninguna manera pueden considerarse como una receta estructural o fijas, ya que las distintas vías metabólicas participan todas en un concepto de absoluta integración y su simultaneidad dependerá de la mayor eficiencia y disminución de los tiempos de latencia o inercia, por esta razón en las clasificaciones metabólicas de los distintos tipos de actividades físicas y deportes podremos hablar de prevalencias y no absolutos metabólicos.

La Glucólisis

En la glucólisis, las moléculas de glucosa o de glucógeno se degradan a piruvato (o lactato). Si la glucosa es la sustancia de partida de la glucólisis, el beneficio neto es de dos moléculas de ATP por molécula de glucosa consumida.

Si la sustancia inicial es el glucógeno, el beneficio por molécula de glucosa es de tres moléculas de ATP. El contenido celular de NAD⁺ es suficiente para sólo unos segundos de activación glucolítica máxima.

Por tanto, un prerrequisito de la producción de energía glucolítica es que la NADH libere continuamente sus electrones e hidrógeno a fin de reformar la NAD⁺. Esta liberación puede producirse de dos modos distintos.

El más ventajoso es la cesión de electrones y protones a la cadena respiratoria mitocondrial, con la consiguiente formación de tres moléculas de ATP por molécula de NADH. Esto exige a su vez un adecuado aporte celular de oxígeno, puesto que la cadena respiratoria es estrictamente aeróbica.

En esta situación, el piruvato formado glucolíticamente es transportado desde el citoplasma hasta la mitocondria para ser convertido en acetilcoenzima A (acetil CoA) y continuar degradándose en el ciclo del ácido cítrico.

Cuando el aporte de oxígeno es inadecuado, por ejemplo durante la realización de un ejercicio intenso, o cuando el ritmo glucolítico es alto, parte de la NAD⁺ es reformada mediante un mecanismo alternativo. Este mecanismo implica la transferencia de electrones e hidrógeno desde la NADH hasta el piruvato (C₃H₄O₃), que es transformado después en lactato (C₃H₆O₃). En esta reacción no se regenera ATP en absoluto, pero la NAD⁺ se vuelve a formar, posibilitando así la producción de ATP mediante el camino glucolítico.

El Acido Láctico (Lactato)

La visión tradicional de que el ácido láctico (lactato) es el resultado del consumo limitado de oxígeno en el tejido no puede considerarse válida. (G.A. Brooks, 1989)

Es un metabolito intermediario cuya formación y distribución representa una importante estrategia en la coordinación de las funciones metabólicas en los diversos tejidos. El ácido láctico (A.L.) no es precisamente un producto sin uso del metabolismo, sino que por el contrario, sirve como fuente de energía, forma de metabolización de los carbohidratos de la dieta y como regulador de la Glucosa en sangre y el Glucógeno del hígado. Sin embargo puede contribuir a la fatiga muscular.

Los programas de entrenamiento deben ser diagramados para minimizar la producción de ácido láctico e incrementar a la vez la desaparición del mismo.

Lejos de ser lo peor del metabolismo, el A.L. es una sustancia clave como proveedor de energía ya que a partir de los carbohidratos de la dieta produce Glucosa en sangre y Glucógeno en el hígado; ayudando a sobrevivir en situaciones estresantes producidas por el ejercicio.

La acumulación de A.L. en el músculo y sangre interfiere en el estímulo nervioso del músculo, el proceso contráctil y la producción de energía necesaria para la contracción.

El A.L. se transforma muy rápidamente y la concentración de A.L. en sangre y músculo, en cualquier momento, es sumamente pequeña, en comparación con la gran cantidad de A.L. que es formado y removido continuamente. Es importante considerar, en el caso de un metabolito como el A.L. que entra y sale muy rápidamente de la sangre, que su concentración dependerá precisamente de la diferencia entre el ingreso y la salida del mismo de la sangre. Más aún, un incremento en la concentración de A.L. no significaría necesariamente que la producción haya aumentado, ya que una disminución en la proporción de A.L. removido en sangre, también pueden incrementar la concentración circulante.

En forma incorrecta, largamente se había asumido que la presencia de A.L. en músculo y sangre significaba que el músculo estaba en estado anaeróbico (privado de O₂) durante el

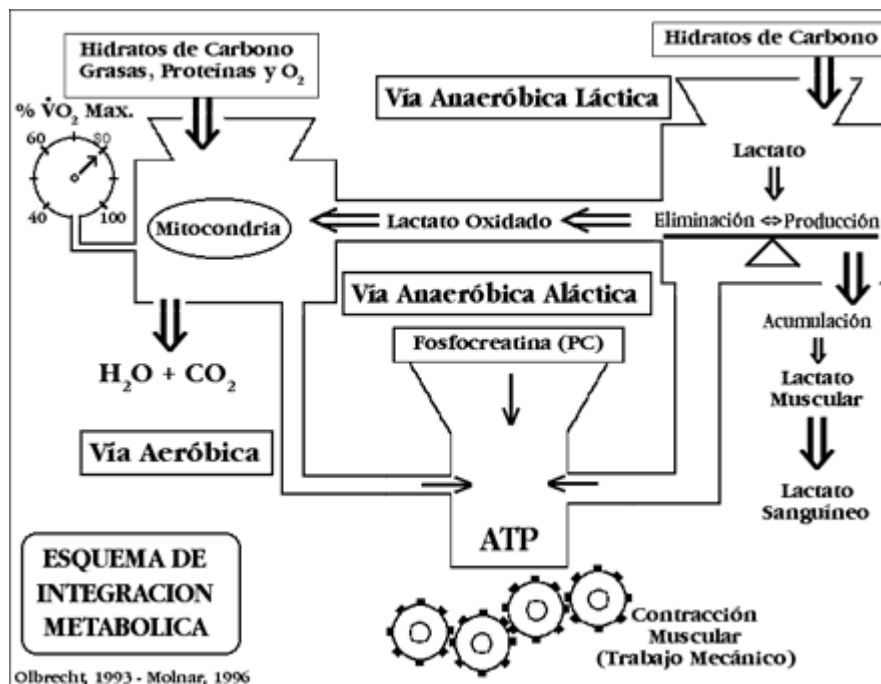
ejercicio. El A.L. es formado y removido en forma continua y frecuentemente en altas proporciones, aún durante el descanso.

El A.L. puede ser formado en el músculo que está adecuadamente oxigenado, y un incremento en la concentración de A.L. en sangre, sólo significaría que la proporción de entrada de A.L. en sangre excede a la proporción removida.

La paradoja de la Glucosa

Paradójicamente el Glucógeno formado en el hígado sigue una ruta indirecta en lugar de una directa. El organismo transforma la Glucosa (metabolito removido en sangre muy lentamente) hacia lactato, que por el contrario es un metabolito removido y utilizado rápidamente. De esta forma se acelera el aprovechamiento de los carbohidratos de la dieta, evitando una salida brusca de insulina a sangre o la estimulación de la síntesis de ácidos grasos.

Estudios de la restitución de Glucosa en sangre y de Glucógeno en el tejido muscular luego de un trabajo exhaustivo, indican que existe una real jerarquización en la restitución de carbohidratos; el orden de prioridad parece ser: 1° Glucosa en sangre; 2° Glucógeno en corazón; 3° Glucógeno en el músculo esquelético y finalmente Glucógeno en hígado.



El "shuttle" de ácido láctico

Esta hipótesis sostiene que el A.L. formado en lugares donde el glucógeno y la Glucosa son utilizados en grandes proporciones, puede ser utilizado como combustible o bien servir como fuente para la gluconeogénesis o como resíntesis de glucógeno.

Si el A.L. formado en fibras musculares activas alcanza fibras adyacentes, puede ser utilizado como combustible y oxidado. Alternativamente, el A.L. formado en las fibras activas puede ingresar en la red capilar y de ahí a la circulación general.

La liberación de A.L. del tejido muscular activo durante el ejercicio será recirculado a esos grupos musculares en cuestión de segundos, siendo nuevamente aprovechado por las fibras altamente oxidativas. A causa de esto, aproximadamente el 75% del A.L. producido durante estado estable (en ejercicio submáximo), es rápidamente usado como fuente de producción de energía aeróbica.

Bioenergética Aplicada (III)

FISIOLOGIA DEL EJERCICIO

Aplicaciones prácticas

El mayor logro de la estrategia del entrenamiento debería tender a minimizar la producción de A.L. e incrementar la remoción del mismo durante la competición; este principio es ya componente de muchos programas contemporáneos de entrenamiento.

Tanto la formación como la remoción de la tasa de A.L. son funciones directas de las relaciones metabólicas, indicadas por el nivel del VO₂ y las concentraciones de A.L. en sangre.

La correcta intensidad del entrenamiento, es importante en el contexto del A.L., porque mejorando la distribución del oxígeno a los músculos, se depende menos de la glucólisis láctica.

El incremento de la capacidad circulatoria acelerará la remoción del A.L. hacia los tejidos que pueden sacarlo de la sangre.

El entrenamiento de duración tiene la ventaja de inducir a las adaptaciones periféricas (musculares) que reducirán la tasa de formación de lactato e intensifican la proporción de la remoción del mismo. Causando incrementos máximos en la capilaridad y capacidad funcional mitocondrial del músculo esquelético.

Una gran capacidad mitocondrial tiende a incrementar el uso de ácidos grasos como combustible, decreciendo entonces la formación de lactato. Así también, una mayor capacidad mitocondrial muscular facilitará la remoción y oxidación del Lactato.

Resumen sobre el Lactato (A.L.)

- *Producción del lactato (RA), significa la aparición o acumulación de A.L.*
- *Remoción del lactato (RD), significa su desaparición o metabolización.*
- *Estado estable del lactato (HLASS), es el estado de equilibrio entra RA y RD.*
- *Turnover del lactato (RT), refleja la reversibilidad de la reacción Piruvato - Lactato.*

- *Acumulación del lactato, se produce cuando RA supera el RD, debido a una alta producción, a una baja remoción o a ambas.*
- *Oxidación del lactato, significa el porcentaje de A.L. oxidado en el Ciclo de Krebs.*
- *El A.L. se considera un producto intermedial y no final. (Turnover)*
- *En todos los niveles de intensidad se forma y elimina lactato.*
- *El lactato medido a nivel sanguíneo aumenta cuando los procesos de producción superan a los de remoción por lo que deberá existir una alta correlación entre el lactato intracelular y su curva de remoción. La concentración de lactato en sangre es representativa del medio intracelular muscular solamente al cabo de un cierto tiempo, durante el cual el lactato es removido de la célula. (Brooks, 1989 - Mazza y Col., 1992)*
- *Establece las variaciones del rendimiento metabólico o de los componentes individuales del mismo, en el transcurso de un programa de entrenamiento, posibilitando el control objetivo de los resultados obtenidos en diferentes etapas o períodos.*
- *Es independiente de factores distintos de los metabólicos, como la motivación, la potencia muscular o la velocidad.*
- *Es el parámetro más representativo de la capacidad metabólica aeróbica-anaeróbica de un individuo, con ventajas sustanciales sobre la determinación del VO₂ máximo.*
- *Es un parámetro metabólico que permite estimar exactamente la maximalidad de un test o prueba funcional.*
- *Nos permite estimar con suma precisión el nivel de rendimiento del individuo y el monto de la carga en donde el beneficio es máximo para el desarrollo de la potencia aeróbica. (Mazza - Alarcón, 1990)*
- *Un corrimiento de la curva de lactato hacia la derecha en el gráfico lactato vs. intensidad indica un aumento de la adaptación metabólica al entrenamiento.*
- *El A.L. es un importante metabolito y es usado para sintetizar el glucógeno en hígado. La oxidación del A.L. es una de nuestras más importantes formas de energía. En células altamente oxidativas (como las células cardíacas y las fibras oxidativas del músculo esquelético) el lactato es el tipo de combustible preferido.*
- *El A.L. también es un ácido orgánico poderoso, y su acumulación puede provocar sensación de dolor e inhibición de la contracción muscular.*
- *La acumulación del A.L. en músculo y sangre pueden interferir en la contracción muscular además de otros procesos y llevar a la fatiga; pero que también el A.L. puede proveer de energía y ayudar a realmacenar fuente de energía.*
- *La hipótesis de la paradoja de la glucosa, describe como el hígado prefiere producir glucógeno indirectamente del A.L. por oposición a la forma directa desde la glucosa.*

- *La hipótesis del shuttle de lactato sostiene que el A.L., que se forma en los músculos activos durante el ejercicio, puede ser efectivamente usado como energía y también para el realmacenamiento de glucógeno en músculo e hígado.*
- *El A.L. formado por la actividad de las fibras glucolíticas de contracción rápida (tipo II) pueden alcanzar las fibras oxidativas de contracción lenta (tipo I) adyacentes, donde es preferido como combustible y puede ser transformado en CO₂ y H₂O.*
- *Al igual que el ATP es el principal y único transportador de energía, las coenzimas NAD, FAD son los principales transportadores de electrones durante los procesos de oxidación.*
- *La importancia de la capacidad del músculo en un medio anaeróbico para convertir el piruvato en lactato, no reside ni en el lactato ni en el piruvato, sino en la conversión resultante de NADH (reducida) en NAD⁺ (oxidada), ya que sin NAD⁺ la glucólisis no puede continuar.*
- *El oxígeno existente a nivel celular garantiza el funcionamiento de la glucólisis «anaeróbica», aunque sea baja la tasa de O₂, nunca llega a ser anaeróbica. La terminología debe adecuarse y concebir la coexistencia metabólica. (J.C. Mazza y Col.)*
- *La velocidad del proceso glucolítico está determinada por la velocidad (intensidad) de la contracción muscular. En intensidades bajas hay una alta reconversión intracelular, en intensidades altas una alta acumulación, pero en intensidades intermedias se dan verdaderos estados de equilibrio metabólicos. Estos estados se manifiestan en los niveles de entrenabilidad de la remoción del lactato y pueden darse desde 1 a 8 mMol/l.*

Efectos de Altos valores del Lactato

- Produce Acidosis en la célula muscular.
- Disminuye la actividad enzimática oxidativa.
- Reduce hasta eliminar la participación de la oxidación de ácidos grasos.
- Produce microrrupturas de la fibra muscular, aumentando el riesgo de lesiones musculares.
- Produce daño estructural en las proteínas contráctiles.
- Presenta plazos de remoción restauración de hasta 96 horas.
- Interfiere los procesos de conducción en la inervación neuromotriz, afectando los patrones coordinativos.