

TRABAJO DE FIN DE GRADO



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE MEDICINA
Grado en Nutrición Humana y Dietética

“Influencia del ciclo hormonal de la mujer en el metabolismo de los macronutrientes”

Autora: Carmen Viciosa Villa
Tutora: Lucía Núñez Llorente

19 de junio 2024

Resumen:

El ciclo hormonal de la mujer tiene un impacto significativo en el metabolismo de los macronutrientes, que son esenciales para la obtención de energía y el mantenimiento de funciones vitales. La evidencia científica confirma que las hormonas sexuales, como la progesterona y el estrógeno, juegan un papel crucial en el metabolismo energético, afectando la manera en que el cuerpo metaboliza carbohidratos, proteínas y grasas. Esta influencia del ciclo hormonal en el metabolismo de los macronutrientes es especialmente notable en deportistas debido a su alta demanda metabólica.

Durante la fase folicular, el aumento del estrógeno mejora la sensibilidad a la insulina, facilitando la utilización de carbohidratos como fuente principal de energía. A su vez promueve la oxidación de grasas, haciendo que la oxidación de estas sea más eficiente.

En la fase lútea, la acción de la progesterona induce resistencia relativa a la insulina y disminuye los niveles de glucógeno activo reduciendo la disponibilidad de la glucosa. Esto lleva a una mayor dependencia de las grasas como fuente de energía y a una menor utilización de carbohidratos, dificultando deportes de velocidad o de corto tiempo a alta intensidad en los que el organismo se apoya en la glucólisis para la obtención de energía. Por el contrario, facilita la realización de deportes de resistencia y ultrarresistencia, en los que la oxidación de las grasas es la principal vía de obtención de energía. La progesterona también aumenta el catabolismo de proteínas, lo que es esencial para la reparación y construcción muscular, esto hace que los requerimientos de aminoácidos esenciales estén elevados y se dificulte la recuperación muscular, aumentando el riesgo de lesiones.

Estos cambios hormonales y su influencia en el metabolismo de los macronutrientes tienen implicaciones importantes para la nutrición y el rendimiento deportivo de las mujeres. Comprender estas variaciones puede ayudar a desarrollar estrategias nutricionales y de entrenamiento más efectivas, adaptadas a las necesidades específicas de cada fase del ciclo menstrual.

En la fase folicular, las recomendaciones son similares a las generales para la nutrición deportiva. Sin embargo, en la fase lútea, se sugiere ingerir hidratos de carbono antes, durante y después del ejercicio para mantener el rendimiento y disminuir el efecto catabólico de la progesterona y así facilitar la recuperación. Por otro lado, la ingesta de proteínas debe ser mayor, con suplementación de BCAA y glutamina para contrarrestar el catabolismo proteico.

Futuras investigaciones deberían enfocarse en la influencia de la ratio estrógeno/progesterona sobre el metabolismo y su impacto en el rendimiento deportivo, así como en mujeres no deportistas. También es necesario actualizar las recomendaciones nutricionales específicas para mujeres según la fase del ciclo menstrual en la que se encuentren.

En conclusión, el ciclo hormonal femenino afecta el metabolismo de los macronutrientes, con implicaciones importantes para la nutrición, la salud y el rendimiento deportivo de las mujeres. Comprender estas variaciones puede contribuir a optimizar la salud y el rendimiento físico de las mujeres, ayudando al desarrollo de estrategias nutricionales y de entrenamiento más efectivas, adaptadas a las necesidades específicas de cada fase del ciclo menstrual.

Índice:

Resumen:	1
Índice:	2
Introducción:	3
Ciclo Hormonal Femenino:	4
Hormonas Sexuales en el Ovario	6
Estrógenos	7
Progesterona	8
Mecanismo de acción de los esteroides ováricos	8
Ciclo Ovárico	11
Fase Folicular (días del 1 al 12)	12
Fase Ovulatoria (días 13 y 14)	12
Fase Lútea (días 15 al 28)	13
Metabolismo de los Macronutrientes durante el ejercicio:	14
Vía de los fosfágenos	15
Glucolisis	15
Glucólisis anaeróbica láctica	16
Glucólisis aeróbica (Aláctico)	16
B-Oxidación	17
Interrelación Entre Ciclo Hormonal y Metabolismo:	18
Metabolismo de los hidratos de carbono	19
Metabolismo de los lípidos	22
Metabolismo de las proteínas	26
Discusión:	28
Conclusiones:	30
Bibliografía:	31
Anexo:	34

Introducción:

El metabolismo de los macronutrientes, hidratos de carbono, grasas y proteínas, es un proceso fundamental para el mantenimiento del equilibrio energético en cualquier organismo.

Sin embargo, este proceso no es estático y puede variar significativamente dependiendo de diferentes factores biológicos, físicos y fisiológicos, entre los cuales se destaca el ciclo hormonal en las mujeres.

El ciclo menstrual, está caracterizado por fluctuaciones en los niveles de hormonas sexuales como la LH, la FSH, el estrógeno y la progesterona. Estas variaciones en la concentración hormonal afectan a la distribución y almacenamiento de los macronutrientes, y a la forma en que el cuerpo de la mujer metaboliza los diferentes macronutrientes y su utilización como fuente de energía, sobre todo ante ejercicios físicos con una exigencia elevada.

Debido a estas variaciones hormonales en las mujeres, ha resultado mucho más complicado estudiar el metabolismo en mujeres o en modelos animales hembras. Por lo que las diferencias en la obtención de energía entre hombres y mujeres ha pasado desapercibida durante mucho tiempo.

Que pocas mujeres realizasen deportes a nivel profesional, sumado a la complejidad para estudiar a este grupo poblacional por las variaciones en el Ciclo hormonal, han sido los principales factores que han influido en la falta de estudio y conocimiento. Esto ha provocado que durante todo este tiempo se hayan utilizado las mismas pautas nutricionales tanto para hombres como para mujeres.

Comprender cómo el ciclo hormonal influye en el metabolismo de los macronutrientes es crucial para tratar aspectos relacionados con la nutrición, el rendimiento físico y la salud integral en las mujeres. Además, esta comprensión puede tener implicaciones significativas en el abordaje nutricional y de ejercicio físico, adaptadas a las distintas fases del ciclo menstrual.

En este contexto, este trabajo de fin de grado tiene como objetivo analizar y discutir la influencia del ciclo hormonal de la mujer en el metabolismo de los macronutrientes, examinando la evidencia científica disponible y explorando las posibles aplicaciones prácticas de estos conocimientos en el ámbito de la salud y la nutrición.

Ciclo Hormonal Femenino:

El ciclo hormonal femenino no se puede explicar sin antes saber de donde procede, como comienza y se instaura. A su vez debemos comprender cuales son las hormonas implicadas en el ciclo y cómo actúan dichas hormonas en el organismo.

Tras la fecundación de un óvulo con un espermatozoide portador de una carga genética haploide con el cromosoma número 23: X, comienza el desarrollo de un organismo diploide que dará lugar a un fenotipo con caracteres femeninos, esto condiciona por lo tanto a la configuración del aparato reproductor de este organismo, siendo en el 5º mes de gestación fetal (aprox.) donde este aparato se desarrolla completamente presentando 3 regiones perfectamente constituidas: un córtex externo, una medula central y un hilio interno.

De estas regiones la que tendrá la influencia predominante en el ciclo hormonal será el Córtex ovárico, está formado por células germinales (los ovocitos) rodeadas de complejos celulares embebidos en el estroma formando los folículos ováricos, recubiertos a su vez por el epitelio germinal. Los folículos ováricos sufrirán una serie de cambios que coincidirán con el grado de desarrollo y diferenciación de los oocitos que contienen.

Estos cambios conforman la doble misión de los ovarios: son responsables de la secreción hormonal tras la pubertad y proporcionaran los gametos femeninos para posibilitar la fecundación por el gameto masculino.

MADURACIÓN DE LOS FOLICULOS Y OVULACIÓN

Este folículo está formado por una capa de células Granulosas que rodean al oocito, separadas del estroma por la lámina Basal, a este conjunto se le llama folículo primordial. En el momento del nacimiento hay unos 2 millones de folículos primordiales, de estos entre el nacimiento y la pubertad

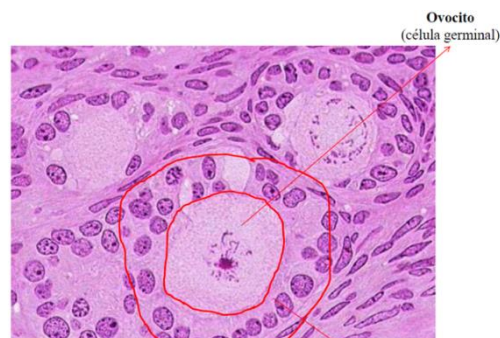


Figura 1: estructura microscópica del ovario, desarrollo folicular

gran parte sufre una atrofia, de manera que cuando una mujer comienza la pubertad tan solo quedan 400 000 gametos disponibles para seguir su maduración en el momento oportuno. (Fig. 1)

Tras la pubertad el hipotálamo libera GnRH y a través de la eminencia media llega a la hipófisis donde estimula la liberación de FSH y LH por las células gonadotropas de la hipófisis. Las gonadotropinas (FSH y LH) son liberadas de forma basal, pero en un determinado momento del ciclo ovulatorio, la hipófisis secretará en forma de pulso FSH y LH en la cantidad suficiente para que el folículo que ha ido madurando a lo largo del ciclo (folículo de Graff) se rompa y expulse el oocito a la cavidad abdominal, allí las fimbrias de la trompa ipsilateral lo captarán y lo transportará al interior del útero, a esto se le llama ovulación.

La FSH y la LH son las causantes del desarrollo y maduración de los “folículos primordiales”. El receptor para la FSH se encuentra únicamente en las células de la granulosa, esta estimulará el desarrollo de un número determinado de folículos primordiales, el folículo dominante se desarrollará más rápido y producirá mayor cantidad de estradiol lo que determinara un incremento de receptores de FSH, y también producirá mayores cantidades de inhibina que tiene un feedback negativo en la producción de FSH, por lo que el folículo dominante inhibirá la secreción de FSH haciendo que su cantidad en sangre sea menor, al haber creado más receptores de esta hormona seguirá desarrollándose incluso con bajas cantidades de ella, esto es lo que le va a diferenciar de los demás folículos, en los que una bajada de FSH provocará su atrofia.

La FSH hace que las células de la granulosa se transformen en células cuboideas maduras, dándole un nuevo nombre a los folículos: “primarios”. Estos comienzan a incrementar sus capas celulares granulosa que secretarán mucopolisacáridos que rodearán al oocito formando la capa pelúcida. A su vez por fuera de la lámina basal se comienzan a formar células alargadas que conforman capas concéntricas denominadas células teca, las más próximas a la lámina basal que será la teca interna y las más periféricas llamadas teca externa. A medida que la granulosa y la teca van madurando aumenta el tamaño del folículo, hasta llegar a los 200µm en la que comienza a aparecer una cavidad central llamada “antro”. Esta formación se denomina folículo de Graff en la que el oocito ocupa una posición excéntrica rodeada de un par de capas de células de granulosa, el “cúmulo oóforo” (Fig2).

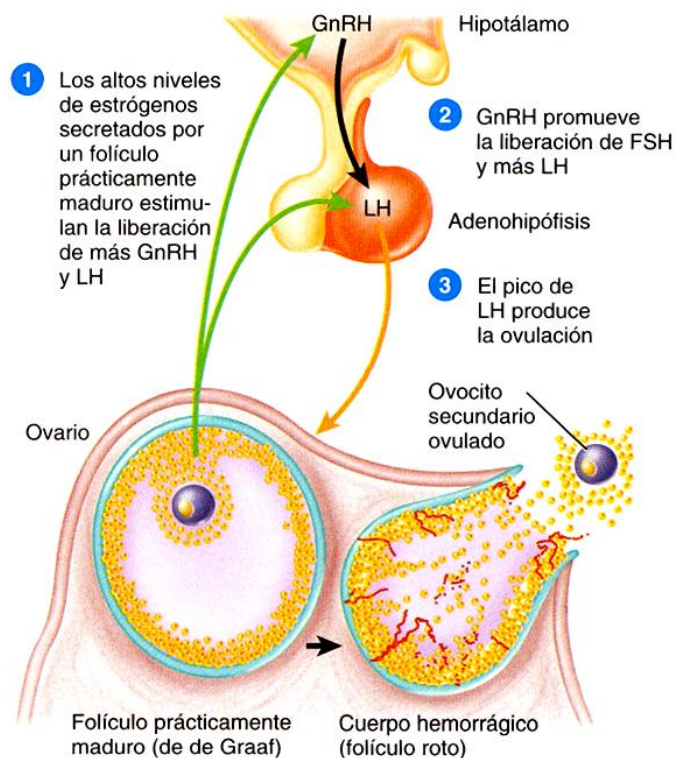


Figura 2: interacción folículo de Graaf e hipófisis, ovulación

La ovulación es la ruptura de la membrana folicular por la acción de un activador del plasminógeno presente en el líquido del folículo. También se ha sugerido que podría estar mediado por una reacción inflamatoria local dependiente de la histamina.

Tras la ovulación y a partir de los restos foliculares hemorrágicos que quedan en el ovario, se transforman dando lugar al proceso de luteinización que creará el cuerpo lúteo, el cual será el responsable de la secreción hormonal de la fase postovulatoria del ciclo.

El cuerpo lúteo durará aproximadamente 14 días, después se forma una cicatriz denominada "Corpus albicans". En caso de que se produzca una fecundación el trofoblasto embrionario secretará gonadotropina coriónica humana (hCG) la cual transformará el cuerpo lúteo en cuerpo gravídico, prolongando y aumentando las secreciones hormonales como la progesterona, la cual es necesaria para el mantenimiento del embarazo.

Hormonas Sexuales en el Ovario

Las hormonas sexuales llamadas esteroides derivan del colesterol, que es obtenido de tres formas: la forma principal que es el circulante en sangre en forma de lipoproteínas de baja densidad (LDL); la síntesis de novo dentro del ovario a partir de acetil CoA y el que es liberado de los ésteres de colesterol de las gotas lipídicas.

La producción de estas hormonas se realiza necesariamente con la interacción de las células de la teca y la granulosa, y el cuerpo lúteo en la segunda fase del ciclo ovulatorio.

Las células de la teca tienen gran vascularización y receptores de LDL, esto posibilita la entrada de colesterol en la célula para comenzar la formación de hormonas. A su vez contienen enzimas capaces de transformar la pregnenolona en andrógenos, pero no son capaces de sintetizar estrógenos.

Una vez los andrógenos son formados se necesita una aromatización del anillo A utilizando la enzima CYP 19 aromatasa para transformar los andrógenos en estrógenos. (fig.3)

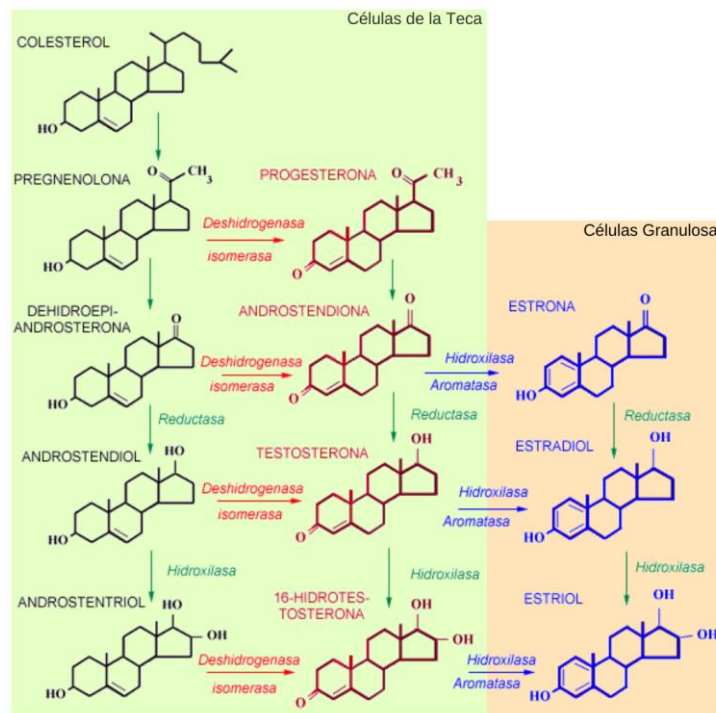


Figura 3. Síntesis de hormonas esteroideas

Los andrógenos sintetizados en las células de la teca son transportados a las células granulosa, que tienen poco acceso al colesterol LDL lo que impide la capacidad de sintetizar pregnenolona y progesterona y andrógenos, allí se da la aromatización y la síntesis de estrógenos.

Estrógenos

Es un compuesto orgánico de 18 átomos de carbono, con un anillo A aromatizado, un grupo hidroxilo en el carbono 3 y un grupo hidroxilo adicional o cetónico. De los estrógenos secretados por el folículo el 95% sería estradiol.

Su secreción, por parte de las células granulosas y el cuerpo lúteo, varía a lo largo del ciclo ovulatorio, 30 pg/ml en fase folicular, 300 pg/ml en la fase periovulatoria disminuyendo los 2-3 días siguientes a la ovulación y subiendo a 200 pg/ml en la fase lútea.

En el plasma circula de tres formas: el 58% unido a albúmina, 40% unido a la proteína transportadora de hormonas sexuales (SHBG) y el 2-3% en forma libre, la cual es la forma activa.

Los estrógenos actúan sobre diversos tejidos del organismo mediante su interacción con receptores nucleares.

A partir de la menopausia la estrona será la hormona predominante, esto se debe a la deficiencia de células de la granulosa con capacidad para producir aromatasa para transformar la testosterona en estradiol y al aumento de conversión periférica (adipocitos) de la androstenediona (producida por la capa reticular de la corteza suprarrenal), para su transformación en estrona.¹

Progesterona

Se trata de un compuesto orgánico de 21 átomos de carbono. La secreción, al igual que los estrógenos varía a lo largo del ciclo, durante la fase folicular los niveles se encuentran en 0,5 ng/ml tras la ovulación el cuerpo lúteo comienza a producirla alcanzando 20 ng/ml. Esta hormona circula unida a la proteína transportadora de cortisol (CBG).

Mecanismo de acción de los esteroides ováricos

Ejercen su acción en los tejidos diana a través de la unión a receptores estrogénicos (ER) y de progesterona.

Estos receptores se encuentran en el núcleo celular, y gracias a la naturaleza lipídica de las hormonas estrogénicas el paso al interior de la célula es a través de la membrana plasmática es por difusión simple.

El complejo hormona-receptor modificará la transcripción genética, lo que da lugar a una consecución de reacciones bioquímicas que se traducirán a proteínas y desencadenarán el efecto biológico y fisiológico en los determinados tejidos. (fig. 4)

Para que el receptor de estrógenos este en forma activa tiene que formar un dímero con otro complejo ER, este dímero interaccionara a través de sus dedos de Zn con los amplificadores (ERE) induciendo la activación o represión de dichos genes.

Los receptores estrogénicos están codificados en los cromosomas 6 y 14, que codifican al ER α y ER β , que se distribuyen de forma desigual en los tejidos del organismo. También se ha visto que existen algunos tipos de receptores estrogénicos de membrana provocando cascadas de señalización intracelular que activará las acciones que estas hormonas ejercen sobre la célula y por lo tanto sobre el sistema.

También se han observado mecanismos de acción postranscripcionales, los cuales provocan que la acción de los estrógenos se ejerza sobre la degradación del ARN, esto causa la regulación de la síntesis proteica o proteólisis.

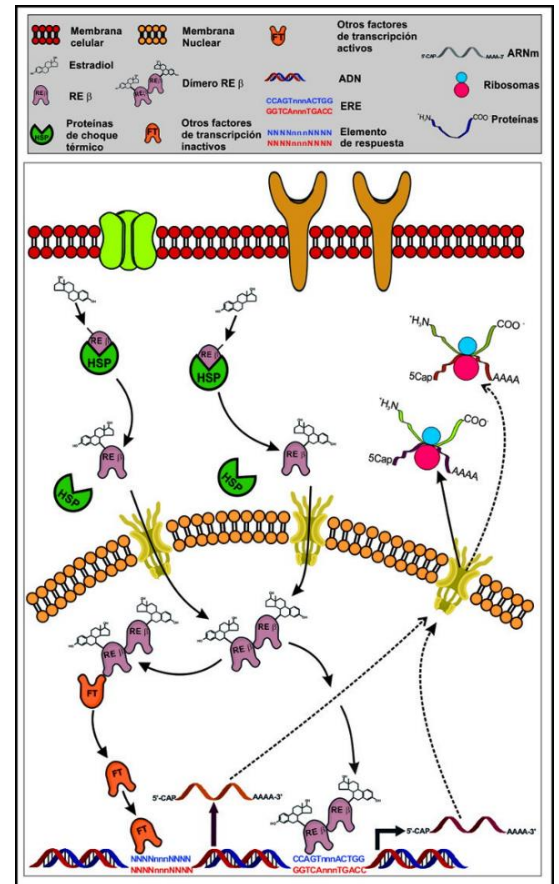


Figura 4. mecanismo de acción de los estrógenos

Acciones de los estrógenos:

Los estrógenos son los causantes de la aparición y mantenimiento de los caracteres sexuales primarios durante la pubertad y el desarrollo de los caracteres secundarios. Tras la pubertad se encargarán de todas las transformaciones cíclicas, aumentando el tamaño del útero y desarrollando el endometrio, así como las células de la superficie vaginal que aumentarán sus reservas de glucógeno. La distribución de la grasa en el organismo también está condicionada por esta hormona, haciendo que predomine un acumulo en la zona de los muslos y caderas.

A su vez tienen efecto sobre el hipotálamo modulando la secreción de GnRH y dopamina, la hipófisis, el tiroides y la glándula suprarrenal; también mantienen el sistema simpático y parasimpático, intervienen en el equilibrio hidrosalino (retención de sodio y agua), incrementan la eficacia en de mecanismos vasodilatadores dependientes de NO y prostaciclina, en el metabolismo del calcio y del fósforo (limitando la reabsorción ósea), también tienen su acción en el metabolismo hidrocarbonado y lipídico (estimulando el anabolismo) y actúan sobre la circulación y coagulación sanguínea.

Los estrógenos también tienen su efecto sobre el perfil lípidos reduciendo los niveles de LDL y aumentando los de HDL.

Acción de la progesterona:

La mayoría de los receptores de progesterona están presentes en el útero, endometrio y mama. Durante la primera fase del ciclo se encargará de hacer proliferar el endometrio preparándolo para una posible anidación, también hace que se aparezcan glándulas en el cérvix que crearan una secreción rica en hidratos de carbono. Por el contrario, en la segunda mitad del ciclo, hará que el moco cervical, las contracciones uterinas y la excitabilidad a la oxitocina sea menor que en la primera parte del ciclo. La progesterona también aumenta el metabolismo basal con la consiguiente acción termogénica, que provoca un aumento de la temperatura basal en el organismo. (fig.5)

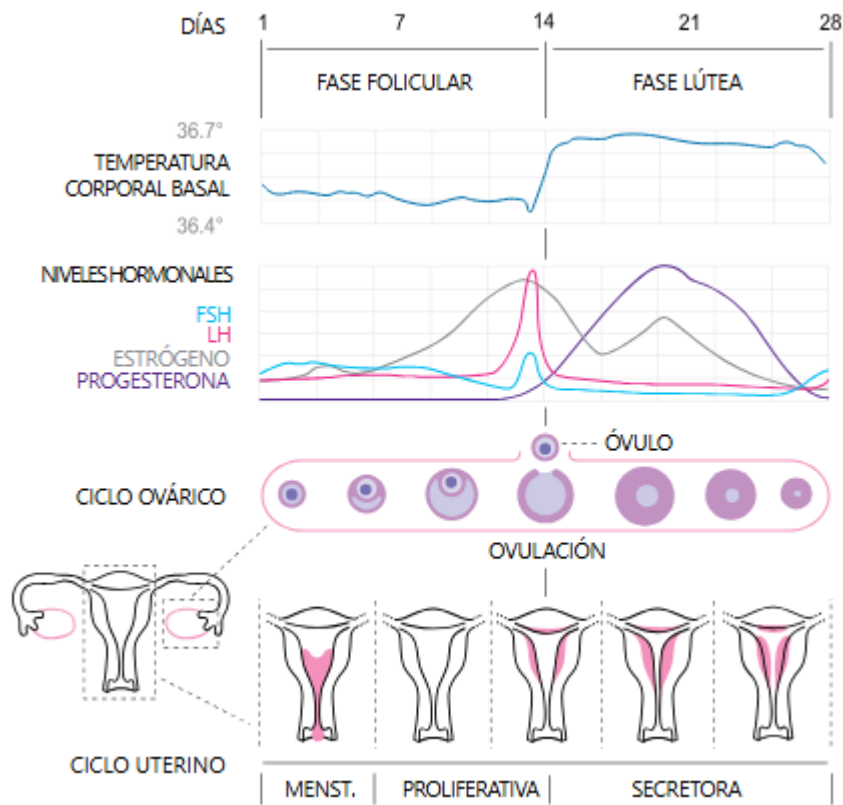


Figura 5. Detalle del ciclo ovulatorio con la interacción entre las glándulas secretoras de hormonas, concentración hormonal en sangre, los folículos, secreción y temperatura.

Ciclo Ovárico

Tras el desarrollo puberal y hasta la menopausia, en un organismo sano, la hipófisis, el hipotálamo y el ovario secretan una serie de hormonas de forma cíclica que afectara a diferentes tejidos del organismo dando lugar a lo que conocemos como ciclo menstrual.

El hecho más relevante de este ciclo es la liberación de un óvulo fecundable una vez en cada ciclo. Sin embarazo, el fenómeno que macroscópicamente es más evidente es el sangrado menstrual que sería el “reseteo” e inicio del siguiente ciclo.

En el ciclo, en un organismo sano con un ciclo teórico de 28 días, se pueden observar 3 grandes fases que se pueden subdividir en 7: (fig. 6)

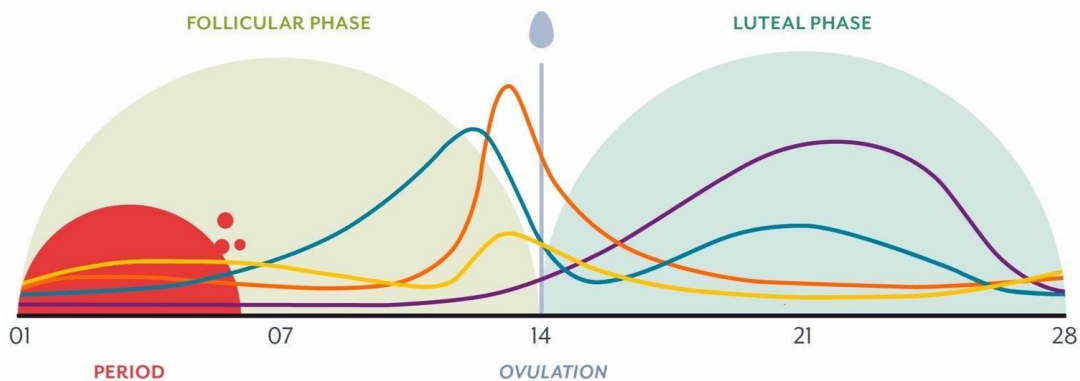


Figura 6. Ciclo hormonal simplificado (naranja: LH / azul: estrógeno / morado: progesterona / amarillo: FSH)

Fase Follicular

- Fase follicular Inicial (días 1-4)
- Fase Follicular Media (días 5-7)
- Fase follicular Tardía (días 8-12)

Fase Ovulatoria (días 13-14)

Fase Lútea

- Fase Lútea Inicial (días 15-21)
- Fase Lútea Media (días 22-24)
- Fase Lútea tardía o Luteolítica (día 25-28)

Fase Folicular (días del 1 al 12)

Fase Folicular Inicial (días 1-4)

El inicio de esta fase está marcado por el comienzo del sangrado menstrual. Se caracteriza por tener unos niveles moderados de FSH y LH, y bajos en hormonas sexuales. Estos niveles altos de FSH permitirán el desarrollo de una cohorte de folículos primarios, en los cuales aumenta el tamaño a través de un aumento en el número de células de granulosa y tanto en ellas como en las células de la teca se dará un aumento de receptores de LH. Los niveles de estradiol y progesterona se mantienen en unos valores mínimos, la media en estudios observados de concentración en plasma de estradiol es de 125 pmol/L, mientras que la progesterona tiene unos valores de 0.380 nmol/L.²

Fase Folicular Media (días 5-7)

Los folículos continúan desarrollándose lo que hace que la producción de estrógenos e inhibina aumente. La Inhibina produce un feedback negativo que provoca la disminución de la producción por parte de la hipófisis de FSH que hace que aquellos folículos con menos receptores de FSH sufran gradualmente un proceso de atrofia, mientras que el que tiene más, continuará desarrollándose hasta convertirse en el folículo dominante que será el que llegue a formar el folículo de Graff. En este folículo dominante se desarrollará completamente las células de la teca interna aumentando el número de células, los receptores de LH y por lo tanto la producción de andrógenos, con unos valores de 172 pmol/L de estrógenos en sangre y 0,21 nmol/L el promedio de progesterona en sangre.

Fase Folicular Tardía. (Días del 8 al 12)

Caracterizada por un aumento de los estrógenos producidos por el folículo dominante, que alcanzarán valores máximos 24-48h antes del pico de LH previo a la ovulación. En este periodo el folículo dominante madura completamente dando lugar al folículo de Graff que tiene un diámetro de 20mm.

El endometrio ha proliferado hasta su punto máximo, el moco cervical comienza a fluidificarse y aumenta su contenido en cloruro sódico debido a los estrógenos.

Fase Ovulatoria (días 13 y 14)

Los niveles de estradiol son máximos (450 - 800 pmol/L).² Esta subida de estradiol en sangre provocará que 24-48 h más tarde se observe un pico de secreción de las hormonas LH (24 IU/L) y FSH, esto dará lugar a la ovulación 16-24 h después.

Es en este momento en el que los estrógenos bajan y la progesterona comenzara a aumentar debido al inicio de la formación del cuerpo Lúteo que lo secretara.

El endometrio tiene su máxima proliferación. El moco cervical tiene gran filancia y fluidez, y la temperatura basal presenta una bajada.

Fase Lútea (días 15 al 28)

Esta fase va desde la ovulación hasta el inicio de un nuevo ciclo con el comienzo del sangrado menstrual.

Se puede dividir, al igual que la fase folicular, en tres subfases:

Fase Lútea Inicial (días 15 - 21)

Tras la ovulación y a partir de los restos foliculares y por la acción de la hormona luteinizante, comienza a formarse el cuerpo lúteo. La progesterona que es secretada por el cuerpo lúteo comenzara a aumentar progresivamente (22,6 nmol/L de media en sangre en esta fase)¹. Los estrógenos vuelven a aumentar, pero nunca superando el pico de la fase folicular.

La LH (9,66 IU/L de media) y la FSH disminuyen hasta llegar a los niveles basales.²

Todo esto se traduce a nivel macroscópico en un aumento de la temperatura basal, la transformación del endometrio en un tejido secretor para permitir la anidación y el mantenimiento del blastocisto en el útero en caso de que haya habido una fecundación del óvulo.

Fase Lútea media (días 22 - 24)

Las hormonas en esta fase dependen del cuerpo lúteo que es en este momento en el que tiene su actividad máxima. Esto provoca que haya una secreción máxima de progesterona (aproximadamente 39,2 nmol/L de media en sangre), mientras que los estrógenos también alcanzan un pico menor que en la fase folicular entre 300 y 500 UI/L.²

Las hormonas FSH y LH tienen los niveles más bajos debido al feedback negativo que ejercen los andrógenos.

El endometrio sigue teniendo una gran función secretora, aunque el moco cervical disminuye notablemente.

Fase Lútea Tardía (días 25 al 28)

Caracterizada por una luteolisis que provoca una bajada de los andrógenos hasta que los niveles esteroides están al mínimo, y por consiguiente una ligera subida de las gonadotropinas, fundamentalmente de la FSH.

Llegado a su fin se produce un desmoronamiento del tejido endometrial y el inicio del flujo menstrual.

(fig. 7)

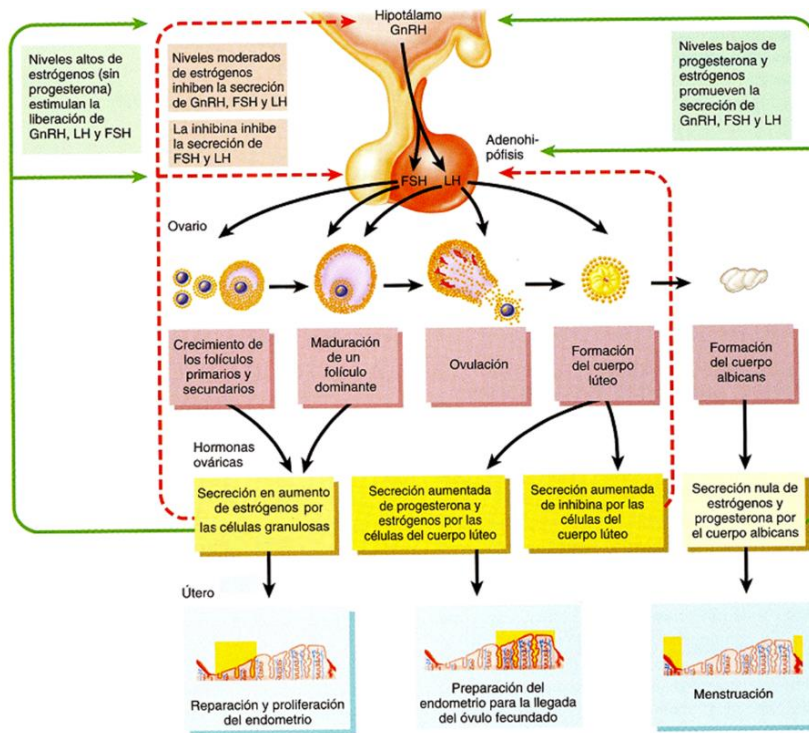


Figura 7. detalle secreción hormonal y acción de las hormonas

Metabolismo de los Macronutrientes durante el ejercicio:

Estudiar la fisiología del organismo ante el ejercicio nos muestra cómo pueden influir los diferentes esfuerzos al metabolismo de los macronutrientes y por lo tanto a la obtención de energía.

Durante el ejercicio se pueden dar tres vías para la obtención de energía, en ocasiones son usadas por el organismo de forma predominante una más que otra, pero nunca de manera exclusiva, en la mayoría de las situaciones el organismo utiliza las vías de forma combinada para aumentar la eficacia y eficiencia a la hora de obtener energía para realizar las actividades exigidas en cada momento.

Las tres vías primordiales son la vía de los fosfágenos (aláctica), la glucólisis (láctica) y la oxidación de grasas.

Cada una de ellas tiene un sustrato y un producto diferente, así como un rendimiento energético diferente y por lo tanto una función diferente. (Fig. 8)

	Moles de ATP/min
Sistema de los fosfágenos	4
Sistema del glucógeno-ácido láctico	2,5
Sistema aeróbico	1

Cuando se comparan los mismos sistemas para la resistencia, los valores relativos son los siguientes:

	Tiempo
Sistema de los fosfágenos	De 8 a 10 s
Sistema del glucógeno-ácido láctico	De 1,3 a 1,6 min
Sistema aeróbico	Tiempo ilimitado (tanto como duren los nutrientes)

Figura 8. Sistemas energéticos

Vía de los fosfágenos

La vía de los fosfágenos es usada por el organismo ante esfuerzos explosivos y muy intensos, de menos de 30 segundos aprox. Se trata de una vía de muy corta duración ya que el organismo utiliza el ATP ya formado para la obtención de energía. Estos reservorios de ATP son muy limitados, por lo que requiere la intervención de otra vía metabólica. Cuando el ATP, ya formado, se acaba, pasa a una segunda fase en la que se utilizará la fosfocreatina que desprenderá un fosfato para formar de ADP a ATP, para seguir proveyendo de energía a las células. La creatinkinasa es la encima encargada de romper la molécula de fosfocreatina a creatina y desprendiendo un fosfato para unirla al ADP formando ATP. (fig.9)

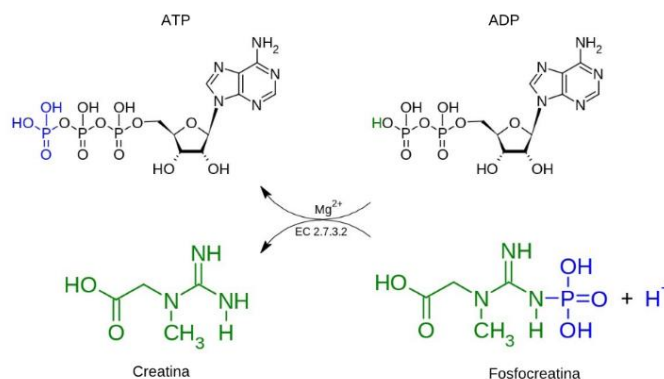


Figura 9. Vía de los fosfágenos

Glucolisis

La siguiente vía que el organismo utilizaría es la **Glucolisis**, esta sintetiza ATP a través de la oxidación de la glucosa, molécula obtenida por la célula del sistema circulatorio. La glucosa absorbida en la digestión pasa al torrente sanguíneo, el organismo al detectar una subida de la

concentración de glucosa en sangre secretará insulina que permitirá la entrada de glucosa en las células, tanto para formar energía como para almacenarlo en forma de glucógeno en los hepatocitos y células musculares estriadas.

La glucólisis tiene un balance energético positivo, con una molécula de glucosa se produce 2ATP, 2NADH+2H y 2 moléculas de Piruvato.

Según las condiciones en las que esta el organismo, se dará una glucólisis láctica (glucólisis anaeróbica láctica) ante una ausencia de oxígeno, y una glucólisis aláctica (glucólisis aeróbica) si hay presencia de oxígeno.

Glucólisis anaeróbica láctica

El piruvato **en ausencia de oxígeno** sufre una fermentación, formando ácido láctico y NAD⁺. Una característica de esta vía láctica es que puede formar moléculas de ATP 2,5 veces más rápido que la oxidación aerobia de la glucosa, aunque es mucho más lenta que la vía de los fosfágenos se puede mantener, más que esta, en el tiempo. (fig. 10)

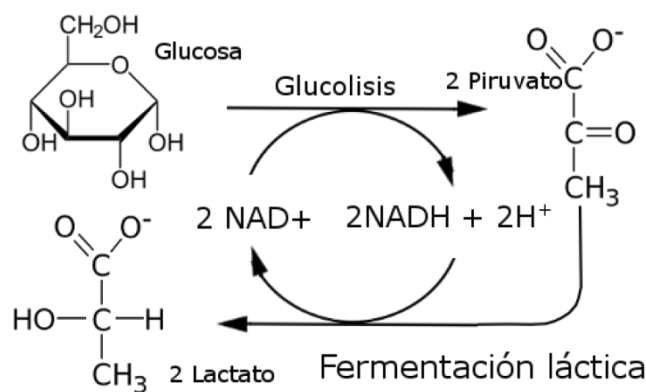


Figura 10. Glucólisis láctica

De manera que cuando se necesitan grandes cantidades de ATP para períodos cortos o medios de contracción muscular, este mecanismo de la glucólisis anaeróbica se utiliza como fuente más rápida de energía.

En las condiciones óptimas el sistema de oxidación anaerobia de la glucosa puede proporcionar de 1'30s a 2' de máxima actividad muscular, tras los 8 a 10 segundos proporcionados por el sistema de los fosfágenos, aunque con una potencia muscular algo menor. ³

Glucólisis aeróbica (Aláctica)

Si hay **presencia de oxígeno** (sistema aeróbico) el piruvato resultante de la glucólisis se transformara en Acetil-CoA y entrara en el ciclo de Krebs hasta su completa oxidación, formando ATP, NADH+H, FADH y CO₂. (fig. 11)

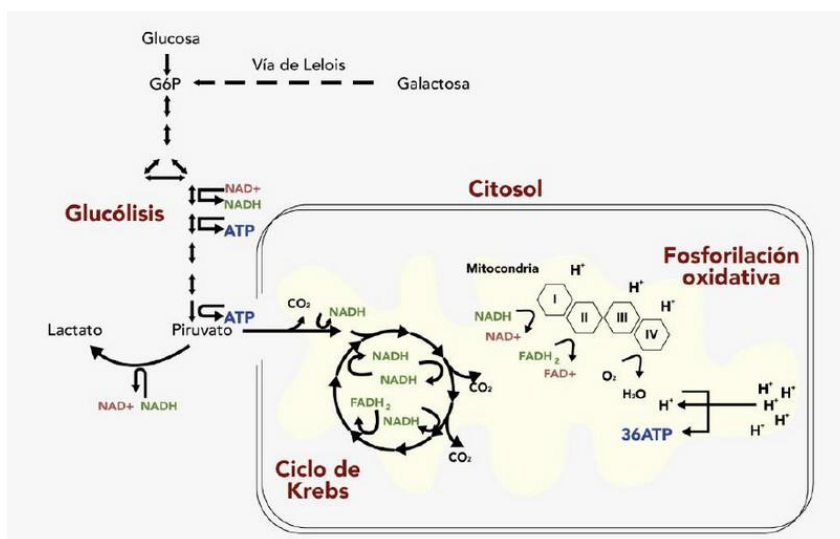


Figura 11. Glucólisis aeróbica

Por lo tanto, una molécula de glucosa tendrá un rendimiento total de 36 moléculas de ATP

La glucólisis aeróbica durará hasta que los depósitos de hidratos de carbono en el organismo se acaben, en ejercicios de intensidad realizados por deportistas entrenados los depósitos de glucógeno se utilizan a una velocidad de 3 - 4 g/min, de manera que, si el ejercicio se prolonga, a las 2 h o menos, habrá una depleción total de los depósitos de glucógeno. ⁴

B-Oxidación

La **Oxidación de las grasas** es la vía utilizada por el organismo ante esfuerzos prolongados y con una intensidad submáxima y de baja intensidad, con un consumo máximo de oxígeno de 50-60 % (VO₂máx) y en deportistas de alto nivel puede llegar hasta el 75%VO₂máx. Tras el agotamiento de los depósitos de glucógeno.

Los ácidos grasos se encuentran en formas de triglicérido en el organismo: en forma de tejido adiposo, circulando en sangre transportados por diferentes lipoproteínas (VLDL, LDL, HDL) o en el tejido muscular (triglicéridos intramusculares o TGIM).

Estos ácidos grasos deben entrar en la célula muscular y posteriormente en la mitocondria para poder ser oxidados. Las proteínas transportadoras (como la CD36 y la FATP) permiten el paso de ácidos grasos activados con el CoA, formando AG Acil-CoA. La entrada a la célula será regulada por el ejercicio físico y la contracción muscular, haciendo que haya mayor disponibilidad de ácidos grasos.

Tras su entrada en la célula deben unirse a la carnitina para poder entrar en la mitocondria, orgánulo en el que se realizara la oxidación de los ácidos grasos en un proceso catabólico denominado Beta-Oxidación.

El producto final de este proceso es acetil-CoA que al igual que he explicado anteriormente entrara en el ciclo de Krebs para ser oxidado totalmente⁵. Este proceso tiene gran eficiencia energética. (fig 12.)

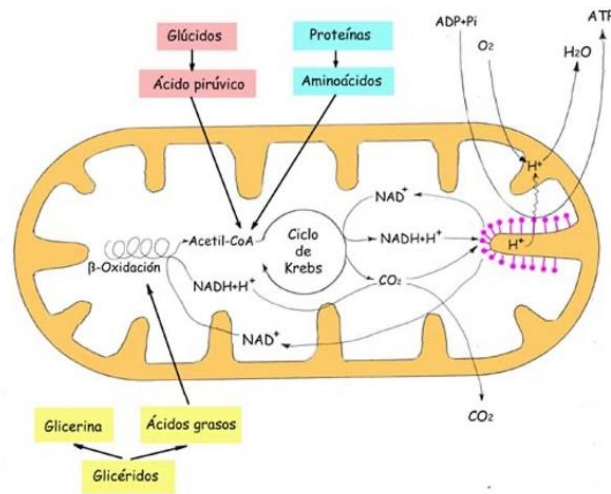


Figura 12. Esquema de la oxidación de las grasas

Interrelación Entre Ciclo Hormonal y Metabolismo:

Uno de los parámetros que se ha visto que está influido por el cambio hormonal que se produce en el ciclo menstrual es: el cociente de intercambio respiratorio (CR: cociente respiratorio), es la relación entre el consumo de O_2 y la producción de CO_2 , esto se mide mediante una técnica no invasiva recogiendo datos de volumen de CO_2 espirado y el volumen de O_2 inspirado. Al hacer el cociente del volumen de CO_2 entre el volumen de O_2 nos da un número que nos permite conocer el tipo de sustrato que está siendo oxidado por el organismo como fuente principal de energía. Cuando el cociente nos da 1 o superior a 1 nos indica que el organismo está utilizando los hidratos de carbono como fuente de energía aeróbica o anaeróbicamente respectivamente. Si el cociente de intercambio respiratorio indica un 0,7 implica un consumo de ácidos grasos, si el cociente de

intercambio respiratorio es de 0,8-0,9 la obtención de energía se está apoyando en la oxidación de las proteínas, lo cual es un signo de alarma para cualquier persona.⁷ (fig. 13)

CR	% DE O ₂ CONSUMIDO EN EL METABOLISMO DE		% DE ENERGÍA PRODUCIDA EN LA OXIDACIÓN DE	
	Carbohidratos	Grasa	Carbohidratos	Grasa
0,70	0	100	0	100
0,75	14,7	85,3	15,6	84,4
0,80	31,7	68,3	33,4	66,6
0,85	48,8	51,2	50,7	49,3
0,90	65,9	34,1	67,5	32,5
0,95	82,9	17,1	84,0	16,0
1,00	100	0	100	0

Figura 13. Tabla de cociente respiratorio (CR)

En varios estudios se ha observado una clara diferencia entre hombres y mujeres en la capacidad de utilización del glucógeno, las grasas y proteínas. Pero más allá de esta diferencia lógica entre sexos debido a la mayor masa muscular promedio y menor porcentaje graso en hombres, se ha observado una diferencia en mujeres en las diferentes fases del ciclo.⁶

Durante la Fase Folicular (FF), los primeros 15 días (aprox.) del ciclo, se observa que el cociente de intercambio respiratorio en mujeres durante la práctica deportiva es más bajo que en hombres, y mayor que en mujeres en fase lútea (FL).⁶

La diferencia en concentración de estrógenos y progesterona a lo largo del ciclo muestra una relación inversamente proporcional, ya que ante un aumento de estas hormonas se da una disminución en el cociente de intercambio respiratorio, es decir, en la fase lútea las mujeres obtienen energía mayoritariamente de los lípidos lo que da un cociente de intercambio respiratorio cercano a 0,7, a diferencia de la fase folicular que el cociente de intercambio respiratorio es más próximo a 1 y nos indica que el organismo está oxidando mayoritariamente hidratos de carbono. Los datos de los estudios no son números tan exactos ya que el organismo siempre obtiene energía de la combinación las rutas metabólicas, utilizando en cada momento la que sea más eficiente para la obtención requerida por el organismo, esto da lugar a números próximos a los valores de una oxidación a base absolutamente de un determinado sustrato.

Metabolismo de los hidratos de carbono

Otros parámetros de interés son la tasa de aparición de la glucosa en sangre (Ra), tasa de desaparición de la glucosa (Rd) y tasa de aclaramiento metabólico (MCR), los cuales fueron observados en varios estudios. En concreto, en un estudio⁶ en el que las mujeres en fase lútea tenían, además de un cociente de intercambio respiratorio más bajo que en la fase folicular, una

baja tasa de aparición, desaparición y tasa de aclaramiento metabólico, tras 90 minutos de ejercicio moderado. A su vez observaron una baja utilización de proglucógeno macroglucógeno, y glucógeno total.

La tasa de aparición de la glucosa está únicamente determinada por la producción endógena de glucosa, la cual es mayoritariamente controlada por la glucogenólisis y la gluconeogénesis, los estrógenos tienen su efecto en el hígado debido al gran número de receptores estrogénicos que hay en las células hepáticas, esto hace que la hormona impida la producción endógena de glucosa a través de la glucogenólisis y la gluconeogénesis en el hígado, reduciendo así el valor de la tasa de aparición de la glucosa.

Por otro lado, la tasa de desaparición de la glucosa es dependiente de la absorción de glucosa mediada por insulina (insulin mediated glucose uptake) y el transporte de glucosa mediado por la contracción muscular.

Aunque el efecto de los estrógenos no afecta en gran medida la cinética de la glucosa, sí que se ha observado que el estrógeno asociado con la progesterona en vez de disminuir los efectos del estrógeno en la cinética de la glucosa, potencian el efecto de los estrógenos sobre esta cinética, esto hace que la tasa de aparición de la glucosa, la tasa de desaparición de la glucosa y tasa de aclaramiento metabólico disminuyan en gran medida en la fase lútea media donde la concentración de progesterona alcanza su pico máximo y los estrógenos tienen una concentración elevada.

Los valores disminuidos de proglucógeno muestran una información muy importante, ya que el proglucógeno es una forma inactiva del glucógeno y la principal forma de almacenamiento de glucosa, localizada mayoritariamente en las células hepáticas y musculares, este se convertirá en glucógeno activo a través de la glucogenólisis, proceso que implica la eliminación de los grupos fosfato. Esta conversión será esencial para liberar glucosa cuando el cuerpo necesita energía. Es la forma de glucógeno más dinámica, que se ha visto que está influida tanto por la diferencia entre sexos como por la diferencia hormonal en las diferentes fases del ciclo.

Por lo que un valor reducido nos indica que el organismo no está accediendo a las reservas de glucógeno hepático para la obtención de energía a través de la glucogenólisis y más tarde la gluconeogénesis.

El macroglucógeno a diferencia del anterior, es el glucógeno en forma activa, con la capacidad de metabolizarse y obtener energía sin la necesidad de un proceso previo. Lo mismo que ocurriría con el proglucógeno, si el valor de macroglucógeno usado está disminuido, nos indica una baja utilización de las reservas de glucógeno hepático para la obtención de energía, pero no se observó diferencia en la utilización de glucógeno muscular en ambas fases. ⁶

Sin embargo, se observa una diferenciación clara en la utilización de glucógeno muscular entre hombres y mujeres en fase lútea, lo que sugiere que se necesita una elevada concentración de estrógenos para observar diferencias. Será las altas concentraciones de estrógeno junto con la progesterona que influyen el metabolismo de los hidratos de carbono.

Al comparar la utilización de ambos en mujeres en fase lútea con las mujeres en fase folicular, se observa una menor utilización de estos, durante la fase lútea, sumado a que el cociente de intercambio respiratorio es bajo, afirma la hipótesis de que en esta fase la accesibilidad a las reservas de glucosa del organismo y la utilización de estas es menor que en fase folicular, por lo que el organismo no tiene acceso a la vía glucolítica como medio de obtención de energía. Esto podría afectar a la hora de realizar un ejercicio físico de alta intensidad y mantenida durante un periodo de tiempo medio, como podría ser deportes en equipo o pruebas de medio fondo.

El organismo al no poder acceder a la glucosa para la obtención de energía se apoya en la oxidación de las grasas para mantener su aporte energético al organismo, a través de la β -oxidación de los ácidos grasos, lo que aumenta o facilita la realización de deportes de baja y media intensidad durante periodos largos de tiempo, como deportes de resistencia o ultra resistencia, y dificulta, como hemos mencionado antes, la realización de deportes que de forma natural se apoyan en la vía glucolítica para la obtención de energía.

Para abordar nutricionalmente esta dificultad para acceder a los hidratos de carbono se debería en primer lugar adaptar los entrenamientos a las necesidades de cada mujer, proponiendo trabajos de más intensidad y más cortos durante la fase folicular y dejando los entrenamientos de resistencia y menor intensidad para la fase lútea, esto hará que el organismo acceda de forma natural a la vía de obtención de energía más eficiente para cada ejercicio a la vez que trabajamos con la predisposición hormonal del organismo. Por otro lado, se ha visto que las dietas de carga de hidratos de carbono son útiles para incrementar al máximo los niveles de glucógeno durante la fase folicular, mientras que en la fase lútea se llega a su máximo con una dieta normal personalizada para deportistas, esto es debido a que el estrógeno aumenta la sensibilidad a la insulina, lo que permite la entrada de glucosa en las células, aumenta la síntesis de glucógeno hepático y por lo tanto facilita alcanzar los niveles máximos de glucógeno.

El problema en el abordaje nutricional de las deportistas no solo está en que hay que adaptar la dieta general a la práctica deportiva teniendo en cuenta su deporte o competiciones, si no que debemos tener en cuenta el ciclo hormonal y en qué fase se encuentran, ya que esto afectara, como se ha explicado anteriormente, a la accesibilidad del organismo a la glucosa para la obtención de energía.

El organismo en fase lútea, gracias a los estrógenos, aumenta los ácidos grasos libres (AGL) y mantiene las reservas de glucógeno, por lo que en el momento en que ya no se puede acceder a la vía glucolítica se comienza a utilizar la vía de oxidación de los ácidos grasos como principalmente de energía. Para retrasar o evitar la utilización de los ácidos grasos como fuente de energía, debemos proveer al organismo de glucosa exógena. Al hacer un aporte de glucosa al organismo la Ra se mantendrá constante y el organismo podrá seguir utilizando la vía glucolítica.

Por lo que el abordaje nutricional que podría ser beneficioso sería: tomar algún alimento o sustancia que fuese una fuente de hidratos de carbono simples de fácil absorción con una combinación de glucosa y fructosa, cada 50-60 minutos de ejercicio por encima del 50% de VO_2 máx. durante la fase lútea, ya que esta modificación en la selección de sustrato influenciada por el estrógeno no se aprecia en mujeres que realizaron ejercicio por debajo del 42% VO_2 máximo. Pudiendo mantener esta práctica durante la fase folicular.

En algunos estudios no se observa diferencia en la utilización de glucógeno en las diferentes fases del ciclo. Esto puede ser debido a que en la mayoría de los estudios se estima la utilización de glucógeno muscular en base a la calorimetría indirecta y la tasa de desaparición de la glucosa, estas son estimaciones indirectas. Sin embargo, al hacer una biopsia del músculo, antes y 60 minutos después del ejercicio, y compararlos con las medidas indirectas, se observó una clara diferencia, haciendo evidente la diferencia en el uso del glucógeno muscular en las distintas fases.

Todas estas diferencias no se han podido observar en mujeres que usan anticonceptivo oral.

Metabolismo de los lípidos

La diferencia entre sexos es clara en cuanto al metabolismo de este macronutriente, siendo evidente la diferencia en el almacenamiento de lípidos en el organismo y la distribución de la grasa corporal. Esto es debido en gran parte a las hormonas específicas de cada sexo, siendo la progesterona y el estrógeno las que influyen en mayor medida en el organismo femenino, mientras que en el masculino serán los andrógenos los que influenciarán el metabolismo y almacenamiento de los lípidos, entre otras cosas.

La primera y más clara diferencia está en el porcentaje de masa grasa corporal total entre hombres y mujeres, siendo más alto en las mujeres en los que el valor óptimo de porcentaje de masa grasa está entre 21-32,09%, mientras que en los hombres el valor que se considera normal es de entre 8-19,9%. (Tabla 1). (Tabla completa en el anexo)

Sexo	Edad	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Mujer	18-39	<21%	21-32,9%	33-38,9%	>39%
Hombre	18-39	<8%	8-19,9%	20-29,9%	>25%

Tabla 1: % de masa grasa

Por otro lado, las mujeres tienen más tejido adiposo subcutáneo, el cual tiende a acumularse en el área abdominal y glúteo-femoral. En estas zonas, los adipocitos en el organismo femenino son más grandes y numerosos que en los hombres, mientras que en la región abdominal la cantidad y tamaño de los adipocitos es similar en ambos sexos. Además, en el tejido adiposo visceral, en las mujeres,

estos adipocitos son de menor tamaño. (fig. 14)

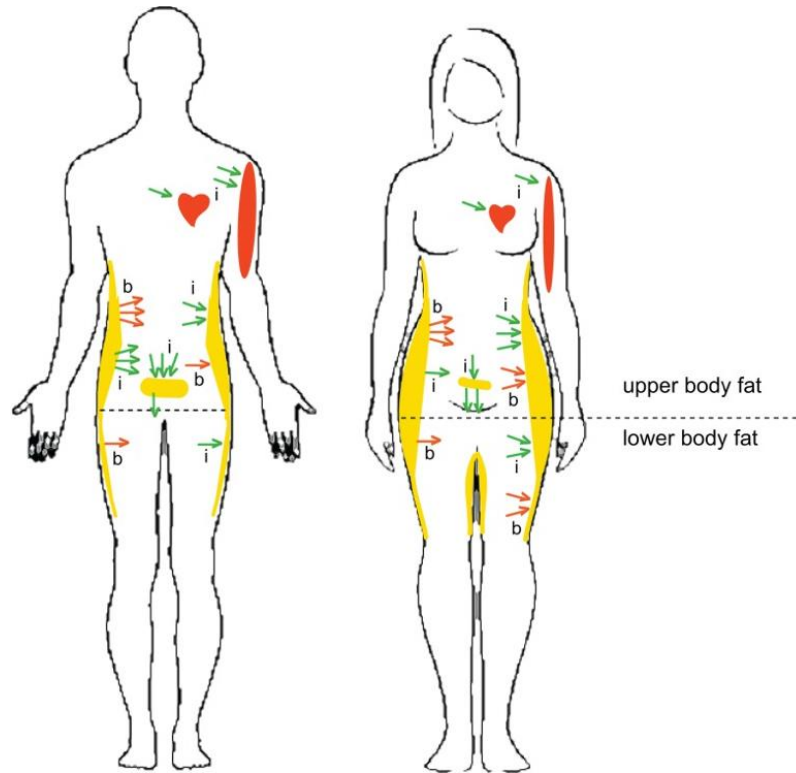


Figura 14. Diferencias en el depósito de grasa¹⁰

Las flechas hacia afuera indican la lipólisis basal (b) e inhibida por insulina (i). Las flechas hacia adentro indican la captación de ácidos grasos libres (FFA) basal (b) y estimulada por insulina (i).

En diferentes estudios se ha observado que el flujo de ácidos grasos en sangre en estado postabsortivo es similar en hombres y mujeres, la diferencia está que en las mujeres la eliminación de ácidos grasos libres del torrente sanguíneo (FFA Clearance) es a través de una reacción no oxidativa de reesterificación de triglicéridos, es decir, que, tras ser sacados de la sangre, no son oxidados y se reesterifican volviéndose a convertir en triglicéridos que se almacenaran en los adipocitos. También en las mujeres esta menos inhibida la liberación a la sangre de ácidos grasos libres desde el tejido adiposo blanco visceral, esto implica que, en las mujeres, los ácidos grasos libres se liberan más fácilmente o en mayor cantidad desde la grasa visceral en comparación con los hombres, incluso cuando las condiciones normalmente suprimirían esta liberación (por ejemplo, después de una comida o en respuesta a ciertas señales hormonales).¹⁰

Por lo tanto, el organismo femenino es más eficiente en el almacenamiento de grasa subcutánea en las áreas glúteo-femorales comparado con la formación de triglicéridos en cualquier tejido adiposo en hombres. Las hormonas esteroideas sexuales son responsables de esta diferenciación entre sexos, lo que sugiere que no solo la acumulación de grasa es diferente, sino también su oxidación.¹⁰

Los estrógenos suprimen directamente la síntesis de triglicéridos en el hígado, pero aumenta la lipólisis de ellos y los libera al torrente sanguíneo, promoviendo la oxidación de los ácidos grasos a través de la B-oxidación.¹³

Como se explicó anteriormente, el metabolismo de los hidratos de carbono se ve afectado por el ciclo hormonal de la mujer, que provoca la supresión de la gluconeogénesis por la acción de las hormonas: estrógenos y progesterona. El aumento de la sensibilidad a la insulina debido a la acción de los estrógenos, contrarrestado con la progesterona que promueve la resistencia a la insulina y dificulta la captación de la glucosa promovida por la contracción muscular, hace que se aumente y facilite la vía de oxidación de los ácidos grasos (B-oxidación) en las células musculares esqueléticas durante el ejercicio.¹⁵

A pesar de que el organismo femenino tiende al almacenamiento de la grasa en el periodo postabsortivo, durante el ejercicio, debido a la facilidad que tiene de liberar a la sangre ácidos grasos libres, las mujeres oxidan más grasas y menos hidratos de carbono, ya que, entre otros factores, la utilización del glucógeno muscular depende de la disponibilidad de ácidos grasos habiendo una correlación negativa entre la utilización de glucógeno y los ácidos grasos libres, cuantos más ácidos grasos libres menor es la utilización del glucógeno muscular durante el ejercicio, provocando que los almacenes de glucógeno se mantengan más o menos estables o que haya una menor depleción de ellos.¹¹

Otro estudio¹⁵ desarrollado en mujeres que hicieron ejercicio en condiciones de altitud demostró que las mujeres al realizar ejercicio intenso en unas condiciones de altitud su organismo obtenía energía de la oxidación de las grasas y en detrimento del uso de los hidratos de carbono. Esto indica que el organismo femenino tiene mayor capacidad y flexibilidad para oxidar ácidos grasos, lo que ayudaría en la realización de ejercicio de moderada intensidad y larga duración como los ejercicios de resistencia y ultrarresistencia, a su vez que esta característica facilita una mejor adaptación a las mujeres a la realización de deportes o ejercicio físico en condiciones de altitud.

A pesar de que lo anteriormente descrito muestra como aumenta la oxidación de las grasas debido a una disminución en la capacidad de oxidación de los hidratos de carbono, otros estudios no muestran una diferencia significativa entre la fase lútea y la fase folicular.

La mayoría de los estudios revisados utilizan la variable tasa de aparición del Glicerol, esta intenta reflejar el índice lipolítico del organismo, ya que en la hidrólisis de los ácidos grasos en músculo se libera glicerol a sangre para ser refosforilado gracias a la enzima glicerol Kinsasa presente en hígado y riñón, así podrá usarse en la reesterificación de triglicéridos. Sin embargo, este parámetro no es del todo fiable y su valor no equivale a la oxidación de los ácidos grasos que se está realizando, primero por que aproximadamente la mitad tasa de aparición del glicerol es cogido por el lecho esplénico y a la otra mitad será recogida por las vías periféricas, es decir el musculo. Por

otro lado, el músculo metaboliza gran parte del glicerol que forma y por lo tanto no se cuenta en la tasa de aparición del glicerol, sería información “perdida” de la lipólisis que está ocurriendo en músculo.²⁷

Debido a esto, hasta la fecha no se han encontrado diferencias significativas en el metabolismo de los lípidos a lo largo del ciclo, asumiendo que el estrógeno no altera la lipólisis.¹⁶

En estudios con animales se ha observado una clara evidencia de aumento de la lipólisis durante el ejercicio debido al estrógeno, que aumenta actividad de la lipoproteína lipasa en músculo y disminuyendo la actividad de esta enzima en tejido adiposo¹⁷⁻¹⁸

Otra variable que se estudia en muchos estudios es la tasa de aparición en sangre de los ácidos grasos libres (FFA Ra). En realidad, este factor es un estimador de la oxidación de los ácidos grasos, intuyendo que todos los ácidos grasos que pasan a sangre más tarde entraran en las células para ser oxidados o almacenados, ahí radica el problema, no se sabe que porción de ácidos grasos al entrar en sangre se oxidan y cuáles no. Por lo que no se observa diferencia entre fases del ciclo. En animales (en concreto en ratas en este estudio) se ha observado que el estrógeno aumenta la sensibilidad a la catecolamina, esto desencadena un aumento lipolítico respondiendo a una activación por la catecolamina.¹⁹

Un estudio²⁰ posterior a estos encontró un factor de corrección, el factor de corrección de acetato, que estima con mayor precisión la oxidación de los ácidos grasos. Este factor es imprescindible para poder determinar con mayor precisión la cantidad de ácidos grasos que se oxidan.

Usando este factor de corrección se observa gran diferencia entre el metabolismo en las diferentes fases del ciclo.²¹ Aunque estas variaciones pueden ser influenciadas por el aumento del catabolismo proteico.

Los lípidos intramiocelulares (IMCL) también son un factor que puede mostrar la utilización de las grasas como fuente de energía a través de su oxidación, algunos estudios han utilizado este parámetro para comparar la oxidación de las grasas entre hombres y mujeres en el ejercicio físico. Para estudiar este parámetro es necesario tomar una biopsia de musculo antes y después o durante el ejercicio físico para poder estudiar la composición de la biopsia y determinar la cantidad de lípidos intramoleculares y compararla con las diferentes biopsias del mismo individuo (antes, durante y después del ejercicio físico) y entre sexos. En varios estudios⁽²²⁻²³⁻²⁴⁾ se vio que en mujeres la utilización de lípidos intramoleculares era mayor durante el ejercicio, ya que tras el ejercicio disminuyo entre un 25²²-28% la cantidad de estos lípidos en músculo, mientras que en la muestra de hombres no variaron significativamente los lípidos intramoleculares, tras 90 minutos de ejercicio. Esto muestra que la influencia de las hormonas sexuales comienza a ser evidente tras 90 minutos de ejercicio físico, esto nos indica que los efectos serán apreciados en las últimas fases de un entrenamiento, ejercicio físico o en deportes o pruebas de ultrarresistencia.

También se observó que tras periodos largos de ejercicio físico las mujeres utilizaban más los triglicéridos, tanto los que estaban en sangre que entran en la célula como lípidos intramoleculares, aumentando su utilización hasta 12,4-3,2 mmol/kg peso seco en mujeres, mientras que en hombres no era apreciable el uso de triglicéridos, ya que oxidaba grasas de otras fuentes. Siendo el 99% de las grasas oxidadas provenientes de los triglicéridos en mujeres, mientras que en hombres tan solo un 28% fue de los triglicéridos.²⁴

Aunque todavía no son concluyentes los resultados, sí que se ve una clara tendencia a que las hormonas del ciclo menstrual afectan el metabolismo de los lípidos en estudios con animales y que las mujeres ante el ejercicio físico tienen un coeficiente de intercambio respiratorio mucho más bajo que los hombres, lo que nos indica que el organismo femenino se apoya más en la oxidación de las grasas²⁴⁻²⁵ para la obtención de energía necesaria para la realización del ejercicio.

A pesar de que no se ha observado una influencia clara, el conjunto de los investigadores está de acuerdo en que hay que investigar más acerca de la influencia las hormonas sexuales en el metabolismo de las grasas, ya que se intuye una influencia en el metabolismo debido a la acción conjunta del estrógeno con la progesterona.

Metabolismo de las proteínas

Los aminoácidos son los componentes básicos de las proteínas, las cuales constituyen la estructura básica y fundamental del tejido muscular. Este tejido es metabólicamente muy activo ya que se estimula ante cualquier actividad del organismo, siendo el responsable del movimiento a través de la contracción de las células musculares.

Debido a su alta actividad metabólica, el tejido muscular necesita ser reparado y sintetizado continuamente. Este se conoce como recambio proteico, es el proceso dinámico y continuo de degradación (MPB) y síntesis (MPS) de las proteínas de las células o tejido. Es un proceso esencial para mantener la homeostasis y la funcionalidad normal de las células y por lo tanto del organismo. Para la síntesis de proteínas es necesario que en la traducción del ARNm haya los aminoácidos necesarios para la formación completa de las proteínas.

En los seres vivos existen 20 aminoácidos, de los cuales 11 son no esenciales (se pueden sintetizar por el organismo a partir de otros) y 9 son esenciales, (fenilalanina, valina, triptófano, treonina, isoleucina, metionina, histidina, leucina y lisina) estos solo se pueden obtener a través de la ingestión de alimentos ricos en estos aminoácidos de la dieta. La síntesis de los aminoácidos tiene diferentes rutas, ya que son diferentes.

Cuando no se cubren los requerimientos de aminoácidos esenciales y están en bajas concentraciones, en el organismo aumenta la degradación de las proteínas musculares para obtener proteínas necesarias y así mantener la homeostasis.

Al contrario, cuando los niveles de aminoácidos son elevados, se produce la síntesis de proteínas que serán incorporados al tejido muscular.

Un adecuado aporte proteico es esencial para el mantenimiento de este equilibrio entre degradación y síntesis proteica.

El efecto anabólico de la ingestión de aminoácidos es debido a la ingestión de aminoácidos esenciales, especialmente los aminoácidos de cadena ramificada (BCAA según sus siglas en inglés) leucina, isoleucina y valina. Los BCAA son cruciales para la estimulación de la síntesis de proteína y reducción del catabolismo, podrían utilizarse como fuente de energía durante el ejercicio cuando las reservas de glucógeno están bajas y son los encargados de estimular la recuperación del daño muscular. En concreto la leucina activa la vía mTOR, vía crucial para la síntesis de proteínas musculares tanto para la reparación del daño como el crecimiento muscular.

Los estudios muestran claramente como la oxidación de los aminoácidos es mayor en la fase lútea en comparación con la fase folicular tanto en reposo o durante el ejercicio ²⁸⁻²⁹ La progesterona es la hormona que provoca el mayor impacto en el catabolismo proteico, a su vez coincide con que en la fase lútea hay una mayor demanda de Lisina por el organismo, haciendo que los requerimientos nutricionales de este aminoácido sean mayores.²⁸ también se ha observado una menor disponibilidad de leucina para su oxidación lo que indica una menor síntesis proteica ²⁹y la concentración de algunos aminoácidos tiende a ser menor en las fase lútea (alanina, glutamina, prolina y isoleucina) tanto en reposo como durante el ejercicio, comparándolo con la fase folicular, esto reafirma en que el catabolismo proteico es mayor durante la fase lútea.

Este aumento del catabolismo debido a la acción de la progesterona es contrarrestado, en parte, por la acción del estrógeno que reduce la oxidación de las proteínas.

Los investigadores sugieren que en próximas investigaciones se estudie la influencia de la ratio de las hormonas E/P en el metabolismo, estos estudios ayudarían a determinar los requerimientos proteicos en deportistas de resistencia o ultrarresistencia.

Esta diferencia en la concentración de aminoácidos se ha visto que es menor si hay una suplementación de carbohidratos durante el ejercicio, sobre todo siguiendo esta pauta durante la fase lútea.

Discusión:

La evidencia científica confirma la hipótesis que muchos investigadores formularon: ¿es posible que las hormonas del ciclo femenino afecten al metabolismo de los diferentes macronutrientes pudiendo afectar por lo tanto al rendimiento deportivo?

Tras la recopilación y lectura de los estudios, podemos afirmar la hipótesis de que las hormonas femeninas tienen un papel muy importante y una gran influencia sobre el metabolismo energético de los macronutrientes.

A pesar de la complejidad para estudiar este grupo poblacional, se ha observado que las hormonas tienen gran influencia en el metabolismo. Estos efectos se han podido ver, sobre todo, en deportistas, ya que la demanda metabólica debido al gran gasto energético facilitaba el estudio de la obtención del sustrato para la formación de energía, y se podía observar si la influencia de las hormonas tenía una influencia significativa en la fisiología del organismo. Aunque la idea principal de esta revisión fue observar la diferente evidencia científica sobre la influencia del ciclo hormonal de la mujer en el metabolismo de los macronutrientes independientemente de su grado de actividad física, los estudios en los que se ha visto que estas hormonas influyen al metabolismo ha sido cuando las mujeres estudiadas realizaban un ejercicio físico con un VO_2 superior al 50%.³⁵⁻³⁶⁻³⁷

Estos resultados muestran que la afectación fisiológica de las hormonas sobre el metabolismo viene condicionada en gran parte por el gasto energético, siendo más evidente ante esfuerzos físicos, sobre todo en ejercicio de resistencia y ultra resistencia. Y por lo tanto no observándose gran diferencia en reposo.

Como conclusión se puede afirmar que el metabolismo de todos los macronutrientes se ve afectado por la actividad de las hormonas sexuales, en concreto por la progesterona y el estrógeno.

En el metabolismo de los hidratos de carbono se ve claramente como el organismo en fase lútea tiene menor disponibilidad de hidratos de carbono, esto es debido a que la acción de la progesterona disminuye los niveles de tasa de aparición (Ra) y desaparición de la glucosa (Rd), tasa de aclaramiento metabólico (MCR) y proglucógeno y macroglucógeno. Esto quiere decir que el glucógeno que debería estar activo para la formación de glucosa, está inactivo o disminuido, disminuyendo así la glucosa disponible en sangre y la capacidad del organismo para acceder a la glucosa como fuente de energía, esto dificultará la realización de deportes de velocidad o explosivos que se apoyen en la vía glucolítica para la obtención de energía.

A su vez el cociente de intercambio respiratorio disminuido en fase lútea nos muestra que el organismo se está apoyando en la oxidación de las grasas para la obtención de energía. Gracias a

la acción de la progesterona, hay mayor disponibilidad de ácidos grasos libres y por lo tanto mayor facilidad para la oxidación de estos. Es un mecanismo que habilita el organismo al no poder acceder a la glucosa para la obtención de energía, este se apoyara en la B-oxidación de las grasas para mantener si aporte energético al organismo, facilita la realización de deportes de baja y media intensidad durante periodos largos de tiempo, como deportes de resistencia o ultra resistencia.

En la fase lútea los niveles altos de progesterona aumentan la capacidad catalítica de las proteínas, esto hace que aumenten los requerimientos básicos de los aminoácidos esenciales, en concreto de los BCAA. Este de la oxidación de las proteínas provoca un balance negativo entre la rotura de proteínas y la síntesis de este macronutriente, esto podría aumentar la dificultad para recuperar el organismo tras un entrenamiento muy exigente o una competición y a su vez aumentar la probabilidad de que ocurran lesiones musculares.

Todos estos efectos se pueden mitigar “ayudando” al organismo haciendo un abordaje nutricional teniendo en cuenta el ciclo menstrual. Durante la fase folicular las recomendaciones durante el ejercicio serian básicamente las recomendaciones generales de nutrición deportiva³⁰. Mientras que durante la FL un abordaje más específico podría ayudar mucho a la realización del ejercicio y a la recuperación posterior.

Se recomienda tomar hidratos de carbono de absorción rápida a partir de los 60´-90´de ejercicio físico o a partir de los 50´ante condiciones extremas de calor, humedad o altitud. En la fase lútea esta es imprescindible tomar una fuente de hidratos de carbono simple 3-4h antes de la realización de ejercicio³¹, durante el ejercicio es muy importante ingerir 30-60 g de hidratos de carbono/hora ara ejercicios de 1h a 2h30min de ejercicio, y más de 90g Hidratos de carbono/hora para ejercicios de más de 2h30min.³⁵ La recomendación para después del ejercicio tiene el objetivo de reponer los depósitos de glucógeno gastados en el ejercicio físico, >1,2 gramos de hidratos de carbono por kg de peso y hora, a ingerir preferiblemente en las 4-6 h posteriores al ejercicio. Esta pauta, aunque está basada en estudios realizados en hombres podrían ayudar a mitigar los efectos de las hormonas en mujeres deportistas, a la espera de estudios más específicos realizados en mujeres.

Por otro lado las recomendaciones sobre la cantidad diaria recomendada de proteínas, se ha visto que en mujeres deportistas como mínimo debe cubrir 1,5 gramos de proteína por kg de peso y día durante la fase folicular, mientras que durante la fase lútea debido al aumento del catabolismo se recomienda subir la cantidad proteica recomendada a mínimo 1,6 gramos por kg de peso y día, hasta un máximo de 2 gramos de proteína por kg de peso y día.³²⁻³³⁻³⁴ Se recomienda suplementar a su vez con BCAA para maximizar la capacidad síntesis proteica del organismo, sobre todo tras el ejercicio físico intenso, así como también de glutamina ya que tiene unos valores más reducidos durante la fase lútea.

Todas estas recomendaciones, aunque son más orientadas a deportistas o mujeres que realicen ejercicio, podrían aplicarse en mujeres que realicen menos ejercicio físico, aunque será en mujeres deportistas donde notaran más la influencia del ciclo y por lo tanto las ayuda que dará la suplementación ergogénica recomendada.

Las investigaciones en el futuro deberían orientarse hacia el estudio de la influencia de la ratio Estrógeno/Progesterona sobre el metabolismo de los macronutrientes, y sus efectos sobre el rendimiento deportivo, así como sus efectos en mujeres no deportistas. También se debería actualizar y pautar recomendaciones nutricionales específicas para mujeres según el momento del ciclo en el que se encuentren.

Conclusiones:

1. Las hormonas del ciclo de la mujer tienen una gran influencia en el metabolismo energético de los macronutrientes.
2. Durante la fase folicular, el aumento de estrógenos mejora la sensibilidad a la insulina, facilitando la utilización de carbohidratos como fuente principal de energía. A su vez promueve que la oxidación de grasas sea más eficiente.
3. Durante la fase lútea, existe una menor disponibilidad de hidratos de carbono debido a que el glucógeno se encuentra inactivo o disminuido, lo cual dificulta el acceso a la glucosa. Esta situación afecta negativamente la capacidad de realizar deportes de velocidad o explosivos.
4. A su vez en la fase lútea, se observa un aumento de la capacidad catalítica de las proteínas, lo que incrementa los requerimientos de los aminoácidos esenciales, esto podría aumentar la dificultad para recuperar el organismo tras el ejercicio.
5. Por lo tanto, la recomendación sería, consumir hidratos de carbono de absorción rápida antes del ejercicio y en mayor cantidad si se está en la fase lútea del ciclo. También, se aconseja aumentar la ingesta de proteínas a entre 1,6 y 2 gramos por kilogramo de peso corporal al día durante esta fase del ciclo menstrual.

Bibliografía:

1. Rang H, Dale M. Farmacología. España: Elsevier , 6ª ed. 2008, pp. 445-461
2. Anckaert E, Jank A, Petzold J, Rohsmann F, Paris R, Renggli M, Schönfeld K, Schiettecatte J, Kriner M. Extensive monitoring of the natural menstrual cycle using the serum biomarkers estradiol, luteinizing hormone and progesterone. *Pract Lab Med*. 2021 Mar 13;25:e00211.
3. <https://www.elsevier.com/es-es/connect/fisiologia-tipo-de-actividad-deportiva-sistemas-energeticos>
4. Pérez-Guisado, J. (2008). Rendimiento deportivo: glucógeno muscular y consumo proteico [Athletic performance: muscle glycogen and protein intake]. *Apunts. Medicina de l'esport*, 43(159), 142-151.
5. Lundsgaard AM, Fritzen AM, Kiens B. Molecular Regulation of Fatty Acid Oxidation in Skeletal Muscle during Aerobic Exercise. *Trends Endocrinol Metab*. 2018; 29(1): 18-30.
6. Michaela C.Devries, Mazen J.Hamadeh, Stuart M.phillips and Mark A. Tarnopolsky. Menstrual cycle phase and sex influence muscle glycogen utilization and glucose turnover during moderate-intensity endurance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2006 Oct;291(4):R1120-8.
7. SportSciences. Cociente de intercambio respiratorio (RER). [Internet]. SportSciences.es; [citado 2024 Jun 11]. Disponible en: <https://sportsciences.es/rer/>
8. J.A.F Tresguerres, C. Castillo. Fisiología humana. Madrid: McGraw-Hill; 2010. Pp.1008-1023.
9. Karastergiou, K., Smith, S.R., Greenberg, A.S. et al. Sex differences in human adipose tissues: the biology of pear shape. *Biol Sex Differ* 3, 13 (2012). <https://doi.org/10.1186/2042-6410-3-13>
10. Varlamov O, Bethea CL, Roberts CT Jr. Sex-specific differences in lipid and glucose metabolism. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2015 Jan 19;5:241. doi: 10.3389/fendo.2014.00241. PMID: 25646091; PMCID: PMC4298229.
11. Carter SL, Rennie C, Tarnopolsky MA. Substrate utilization during endurance exercise in men and women after endurance training. *Am J Physiol Endocrinol Metab* (2001) 280:E898–907
12. Braun B, Mawson JT, Muza SR, Dominick SB, Brooks GA, Horning MA, et al. Women at altitude: carbohydrate utilization during exercise at 4,300 m. *J Appl Physiol (1985)* (2000) 88:246–56.
13. D'Eon TM, Souza SC, Aronovitz M, Obin MS, Fried SK, Greenberg AS. Estrogen regulation of adiposity and fuel partitioning. Evidence of genomic and non-genomic

- regulation of lipogenic and oxidative pathways. *J Biol Chem* (2005) 280:35983–91. 10.1074/jbc.M507339200
14. Campbell SE, Febbraio MA. Effect of ovarian hormones on mitochondrial enzyme activity in the fat oxidation pathway of skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab* (2001) 281:E803–8
 15. Braun B, Mawson JT, Muza SR, Dominick SB, Brooks GA, Horning MA, Rock PB, Moore LG, Mazzeo RS, Ezeji-Okoye SC, Butterfield GE. Women at altitude: carbohydrate utilization during exercise at 4,300 m. *J Appl Physiol* (1985). 2000 Jan;88(1):246-56
 16. Horton TJ, Miller EK, Bourret K. No effect of menstrual cycle phase on glycerol or palmitate kinetics during 90 min of moderate exercise. *J Appl Physiol* (1985). 2006 Mar;100(3):917-25.
 17. Hansen FM, Fahmy N, Nielsen JH. The influence of sexual hormones on lipogenesis and lipolysis in rat fat cells. *Acta Endocrinol (Copenh)*. 1980 Dec;95(4):566-70.
 18. Ellis GS, Lanza-Jacoby S, Gow A, Kendrick ZV. Effects of estradiol on lipoprotein lipase activity and lipid availability in exercised male rats. *J Appl Physiol* (1985). 1994 Jul;77(1):209-15.
 19. Benoit V, Valette A, Mercier L, Meignen JM, Boyer J. Potentiation of epinephrine-induced lipolysis in fat cells from estrogen-treated rats. *Biochem Biophys Res Commun*. 1982 Dec 31;109(4):1186-91
 20. Sidossis LS, Coggan AR, Gastaldelli A, Wolfe RR. A new correction factor for use in tracer estimations of plasma fatty acid oxidation. *Am J Physiol*. 1995 Oct;269(4 Pt 1):E649-56.
 21. Oosthuysen T, Bosch AN, Jackson S. Effect of menstrual phase on the acetate correction factor used in metabolic tracer studies. *Can J Appl Physiol*. 2003 Dec;28(6):818-30.
 22. Steffensen CH, Roepstorff C, Madsen M, Kiens B. Myocellular triacylglycerol breakdown in females but not in males during exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2002 Mar;282(3):E634-42.
 23. Devries MC, Lowther SA, Glover AW, Hamadeh MJ, Tarnopolsky MA. IMCL area density, but not IMCL utilization, is higher in women during moderate-intensity endurance exercise, compared with men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2007 Dec;293(6):R2336-42.
 24. Roepstorff C, Steffensen CH, Madsen M, Stallknecht B, Kanstrup IL, Richter EA, Kiens B. Gender differences in substrate utilization during submaximal exercise in endurance-trained subjects. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2002 Feb;282(2):E435-47.

25. Friedlander AL, Casazza GA, Horning MA, Huie MJ, Piacentini MF, Trimmer JK, Brooks GA. Training-induced alterations of carbohydrate metabolism in women: women respond differently from men. *Journal of Applied Physiology*. 1998 Sept. Vol 85, issue 3, Pag 1175-1186
26. Horton TJ, Pagliassotti MJ, Hobbs K, Hill JO. Fuel metabolism in men and women during and after long-duration exercise. *Journal of Applied Physiology*. Nov 1998. Vol 85, issue 5, pag 1823-1832
27. Oosthuyse T, Bosch AN. The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Med*. 2010 Mar 1;40(3):207-27.
28. Kriengsinyos W, Wykes LJ, Goonewardene LA, Ball RO, Pencharz PB. Phase of menstrual cycle affects lysine requirement in healthy women. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2004 Sep;287(3):E489-96
29. Brian C. Cooper M.D., Cynthia K. Sites M.D. , Peter R. Casson M.D., Michael J. Toth Ph.D. Ovarian suppression with a gonadotropin-releasing hormone agonist does not alter insulin-stimulated glucose disposal. *Fertility and Sterility*. Vol 87, Issue 5, May 2007, Pages 1131-1138
30. González Gross, M. M. (2020). *Nutrición deportiva: Desde la fisiología a la práctica*. Editorial Médica Panamericana.
31. Rehrer, N.J., McLay-Cooke, R.T., Sims, S.T. Nutritional Strategies and Sex Hormone Interactions in Women. In: *Sex Hormones, Exercise and Women*. Springer 2023.p.82-112.
32. Houltham SD, Rowlands DS. A snapshot of nitrogen balance in endurance-trained women. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014 Feb;39(2):219-25.
33. Lariviere F, Moussalli R, Garrel DR. Increased leucine flux and leucine oxidation during the luteal phase of the menstrual cycle in women. *Am J Physiol*. 1994 Sep;267(3 Pt 1):E422-8.
34. Bailey SP, Zacher CM, Mittleman KD. Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *J Appl Physiol* (1985). 2000 Feb;88(2):690-7.
35. Holtzman B, Ackerman KE. Recommendations and Nutritional Considerations for Female Athletes: Health and Performance. *Sports Med*. 2021 Sep;51(Suppl 1):43-57.
36. Campbell SE, Angus DJ, Febbraio MA. Glucose kinetics and exercise performance during phases of the menstrual cycle: effect of glucose ingestion. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2001 Oct;281(4):E817-25.
37. Zderic TW, Coggan AR, Ruby BC. Glucose kinetics and substrate oxidation during exercise in the follicular and luteal phases. *J Appl Physiol* (1985). 2001 Feb;90(2):447-53.

Anexo:

La tabla está basada en las investigaciones de H.DMcCarthy y col. En International Journal of Obesity, vol.30, 2006, y de Gallagher y col. American journal of Clinical Nutrition, vol. 72, sept.200.

Sexo	Edad	- (Bajo)	0 (Normal)	+ (Alto)	++ (Muy alto)
Mujer	6	< 13,8%	13,8 - 24,9%	25,0 - 27,0%	≧ 27,1%
	7	< 14,4%	14,4 - 27,0%	27,1 - 29,6%	≧ 29,7%
	8	< 15,1%	15,1 - 29,1%	29,2 - 31,9%	≧ 32,0%
	9	< 15,8%	15,8 - 30,8%	30,9 - 33,8%	≧ 33,9%
	10	< 16,1%	16,1 - 32,2%	32,3 - 35,2%	≧ 35,3%
	11	< 16,3%	16,3 - 33,1%	33,2 - 36,0%	≧ 36,1%
	12	< 16,4%	16,4 - 33,5%	33,6 - 36,3%	≧ 36,4%
	13	< 16,4%	16,4 - 33,8%	33,9 - 36,5%	≧ 36,6%
	14	< 16,3%	16,3 - 34,0%	34,1 - 36,7%	≧ 36,8%
	15	< 16,1%	16,1 - 34,2%	34,3 - 36,9%	≧ 37,0%
	16	< 15,8%	15,8 - 34,5%	34,6 - 37,1%	≧ 37,2%
	17	< 15,4%	15,4 - 34,7%	34,8 - 37,3%	≧ 37,4%
	18 - 39	< 21,0%	21,0 - 32,9%	33,0 - 38,9%	≧ 39,0%
	40 - 59	< 23,0%	23,0 - 33,9%	34,0 - 39,9%	≧ 40,0%
60 - 80	< 24,0%	24,0 - 35,9%	36,0 - 41,9%	≧ 42,0%	
Hombre	6	< 11,8%	11,8 - 21,7%	21,8 - 23,7%	≧ 23,8%
	7	< 12,1%	12,1 - 23,2%	23,3 - 25,5%	≧ 25,6%
	8	< 12,4%	12,4 - 24,8%	24,9 - 27,7%	≧ 27,8%
	9	< 12,6%	12,6 - 26,5%	26,6 - 30,0%	≧ 30,1%
	10	< 12,8%	12,8 - 27,9%	28,0 - 31,8%	≧ 31,9%
	11	< 12,6%	12,6 - 28,5%	28,6 - 32,6%	≧ 32,7%
	12	< 12,3%	12,3 - 28,2%	28,3 - 32,4%	≧ 32,5%
	13	< 11,6%	11,6 - 27,5%	27,6 - 31,3%	≧ 31,4%
	14	< 11,1%	11,1 - 26,4%	26,5 - 30,0%	≧ 30,1%
	15	< 10,8%	10,8 - 25,4%	25,5 - 28,7%	≧ 28,8%
	16	< 10,4%	10,4 - 24,7%	24,8 - 27,7%	≧ 27,8%
	17	< 10,1%	10,1 - 24,2%	24,3 - 26,8%	≧ 26,9%
	18 - 39	< 8,0%	8,0 - 19,9%	20,0 - 24,9%	≧ 25,0%
	40 - 59	< 11,0%	11,0 - 21,9%	22,0 - 27,9%	≧ 28,0%
60 - 80	< 13,0%	13,0 - 24,9%	25,0 - 29,9%	≧ 30,0%	

junto con la clasificación en cuatro niveles por parte de Omron Heathcare.