



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**



**INFLUENCIA DEL EJERCICIO AERÓBICO SOBRE LA CONTRACCIÓN DEL  
MÚSCULO CUÁDRICEPS DE RATA HEMBRA**

**TESIS**

Para obtener el título de

**BIÓLOGO**

**PRESENTA:**

**Angel Román León Quintanar**

**Directora de tesis: Dra. Bertha Segura Alegría**

**Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre Angelica Quintanar que siempre me enseñó el valor de la responsabilidad y siempre me apoyo en todas y cada una de las decisiones que tome, me enseñó a nunca rendirme y dar todo para conseguir mis objetivos, gracias a ella hoy soy lo que soy y pude llegar al lugar en el que me encuentro.

A mi abuelito Román Quintanar que siempre fungió como un padre para mí.

A José Martín que siempre me apoyó y estuvo para mí en todo momento.

A Ana Luisa Rivero que se convirtió en mi general mahoraga, cuidándome, apoyándome, explicándome los temas que se me dificultaban y confiando día con día en mí.

A Alexis Quintanar, Adrián Quintanar, Daniel Quintanar y Ángel Quintanar por ser unos primos increíbles y compañeros de aventuras, son los más cracks y todos saldrán adelante.

A Fabian Quintanar por confiar que podía salir adelante y enseñarme que a pesar de que las cosas no estén a tu favor siempre puedes tener una buena cara y seguir adelante.

A la doctora Bertha Segura, que se convirtió en la mejor profesora para mí, pues me brindo la oportunidad de trabajar y aprender de ella, además de darme la oportunidad de conocer a más personas y seguirme desarrollando tanto en el ámbito académico como profesional.

A Israel Lemus, por después de tantos años seguir siendo mi mejor amigo.

A Leonardo Chávez por todas las risas y buenos momentos.

Este pequeño logro es por todos y cada uno de ustedes, gracias, por tanto.

Nah, puedo ganar.

# Índice de contenido

Agradecimientos	2
RESUMEN	4
Abstract	5
INTRODUCCIÓN	6
Estructura del músculo esquelético	7
Contracción muscular	10
Tipos de fibras musculares. Unidades motoras	13
Ejercicio y su metabolismo	17
Ejercicio aeróbico	18
Diferencias de género en el metabolismo.	19
Papel de Catecolaminas en el ejercicio	20
ANTECEDENTES	21
OBJETIVOS:	22
MATERIALES Y MÉTODOS	23
RESULTADOS	26
DISCUSIÓN	29
CONCLUSIONES	34
PERSPECTIVAS.	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ANEXO 1	40

## RESUMEN

La principal función del músculo esquelético es la contracción, esto significa que se acorta (realizando la flexión o extensión de las articulaciones), lo cual permite que el organismo se desplace de un sitio a otro; y también desarrolla fuerza logrando que el animal permanezca erecto, aún en contra de la acción de la gravedad. Además, contribuye a mantener la homeostasis de otros órganos del cuerpo, debido a que contribuye a mantener la temperatura corporal y almacena carbohidratos y grasas que pueden ser utilizados como fuente energética por otros tejidos y por él mismo.

El tejido muscular es el más abundante en el cuerpo de los mamíferos, ya que corresponde aproximadamente al 40% del peso corporal del organismo. Además, siendo un tejido extremadamente plástico, tiene la capacidad de transformar sus características morfológicas y sus propiedades funcionales, para adaptarse a los requerimientos que le exige su entorno.

Una de las actividades que se realizan cotidianamente y que puede modificar la morfología y la función del músculo esquelético, es el ejercicio aeróbico de intensidad moderada. Además, la respuesta a esta actividad depende de la condición de quien la realiza, de manera que los cambios observados serán distintos en organismos jóvenes o viejos, sanos o enfermos, hembras o machos.

El presente trabajo, tuvo como objetivo principal establecer el efecto del nado en ratas hembra (30 minutos/día, durante tres semanas), sobre las propiedades mecánicas del músculo cuádriceps, al ser estimulado con frecuencias crecientes (0.5, 15, 30, 50 y 75 Hz). Se cuantificaron, además el peso corporal, el peso del músculo y el área de sección transversal (AST) del músculo en estudio.

Nuestros resultados muestran que el músculo cuádriceps de la rata hembra sometida a nado durante tres semanas no modificó la tensión desarrollada (N/g de tejido), respecto a la respuesta del mismo músculo de ratas control (sedentarias). Lo que se explica considerando que, en el ejercicio realizado, la participación de los músculos posturales (extensores, como el cuádriceps), es limitada, debido a que el nado se efectúa en ausencia de gravedad, ya que el organismo se encuentra flotando.

Además, se encontró una reducción significativa en el peso corporal de las hembras sometidas a nado, pero no hubo cambios significativos en el peso ni en el AST del músculo cuádriceps de las hembras experimentales, comparativamente con las controles. Estos resultados se explican considerando que las hembras tienen la capacidad de almacenar más grasas que los machos, pero también cuentan con los mecanismos que les permiten movilizarlas eficientemente durante la ejecución de ejercicio aeróbico de intensidad moderada, por lo cual hubo reducción en los almacenes de grasas, pero en los componentes del músculo esquelético.

## **ABSTRACT**

The main function of skeletal muscle is contraction, this means that it shortens (flexing or extending the joints), which allows the body to move from one place to another; and it also develops strength by ensuring that the animal remains erect, even against the action of gravity. In addition, it contributes to maintaining the homeostasis of other organs in the body, because it helps maintain body temperature and stores carbohydrates and fats that can be used as an energy source by other tissues and by itself.

Muscle tissue is the most abundant in the body of mammals, since it corresponds to approximately 40% of the organism's body weight. Furthermore, being an extremely plastic fabric, it has the ability to transform its morphological characteristics and functional properties, to adapt to the requirements demanded by its environment.

One of the activities performed daily that can modify the morphology and function of skeletal muscle is moderate intensity aerobic exercise. Furthermore, the response to this activity depends on the condition of the person performing it, so the changes observed will be different in young or old organisms, healthy or sick, female or male.

The main objective of the present work was to establish the effect of swimming in female rats (30 minutes/day, for three weeks), on the mechanical properties of the quadriceps muscle, when stimulated with increasing frequencies (0.5, 15, 30, 50 and 75Hz). Body weight, muscle weight and cross-sectional area (TSA) of the muscle under study were also quantified.

Our results show that the quadriceps muscle of the female rat subjected to swimming for three weeks did not modify the tension developed (N/g of tissue), compared to the response of the same muscle of control (sedentary) rats. This is explained considering that, in the exercise performed, the participation of the postural muscles (extensors, such as the quadriceps), is limited, because the swim is carried out in the absence of gravity, since the body is floating. Furthermore, a significant reduction was found in the body weight of the females subjected to swimming, but there were no significant changes in the weight or AST of the quadriceps muscle of the experimental females, compared to the controls. These results are explained considering that females have the capacity to store more fat than males, but they also have the mechanisms that allow them to mobilize them efficiently during the execution of moderate intensity aerobic exercise, which is why there was a reduction in fat stores., but in the components of skeletal muscle.

## **INTRODUCCIÓN**

El músculo esquelético se compone principalmente de agua, proteínas y otras sustancias, como sales inorgánicas, minerales, grasas y carbohidratos. Cabe señalar que las proteínas son el componente más abundante del músculo esquelético y que durante la vida del organismo, éstas se renuevan constantemente. De manera que la masa muscular depende del equilibrio entre la síntesis y degradación de dichas proteínas y ambos procesos se pueden ver afectados por el estado nutricional, el equilibrio hormonal, la actividad física, el ejercicio continuo, las lesiones y las enfermedades, entre otros factores.

La función principal del músculo esquelético es convertir la energía química en energía mecánica para generar fuerza y potencia, mantener la postura y producir movimientos que influyan en la actividad física del organismo, además contribuye al metabolismo energético basal, ya que sirve como almacenamiento de sustratos importantes como aminoácidos y carbohidratos, produce calor para mantener la temperatura corporal y consume la mayor parte del oxígeno utilizado durante la actividad física y el ejercicio (Frontera y Ochala, 2015).

# ESTRUCTURA DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO

Cada músculo esquelético está compuesto por cientos o miles de células individuales, alargadas y multinucleadas llamadas fibras, que son estructuras cilíndricas largas rodeadas por una membrana plasmática llamada sarcolema. Además, cada fibra está rodeada por una delgada capa de tejido conectivo llamada endomisio (membrana externa) y cientos o miles de estas fibras se encuentran envueltas por otra delgada capa de tejido conectivo llamada perimisio formando un haz de fibras llamado fascículo. Varios fascículos se unen a un tendón en cada extremo, constituyendo un músculo, el cual también se encuentra rodeado por tejido conectivo, llamado epimisio (figura 1A).

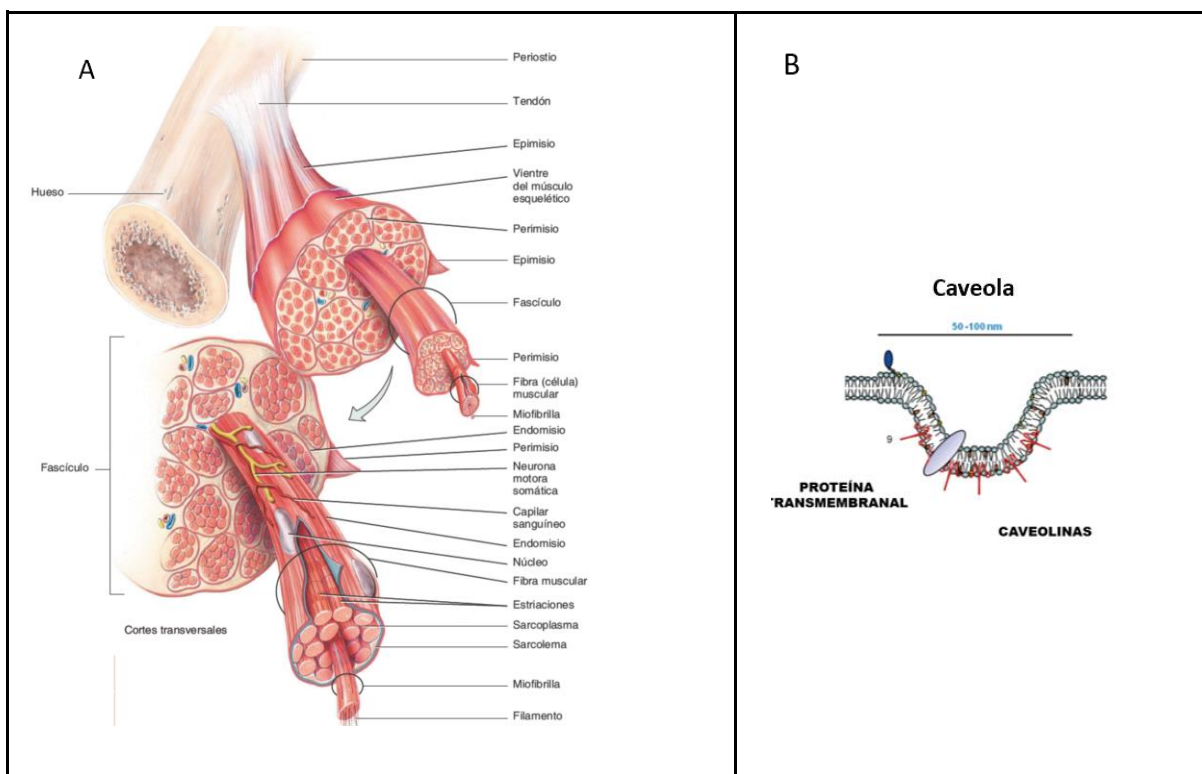


Figura 1. A. Organización morfológica del músculo esquelético (Tomado de Tortora y Derrickson 2006). B. Organización estructural de las caveolas (Modificado de Ramos, 2020).

Cabe señalar que en el sarcolema se ha descrito la presencia de pequeñas invaginaciones (con forma de letra  $\Omega$  invertida), denominadas caveolas; se trata de



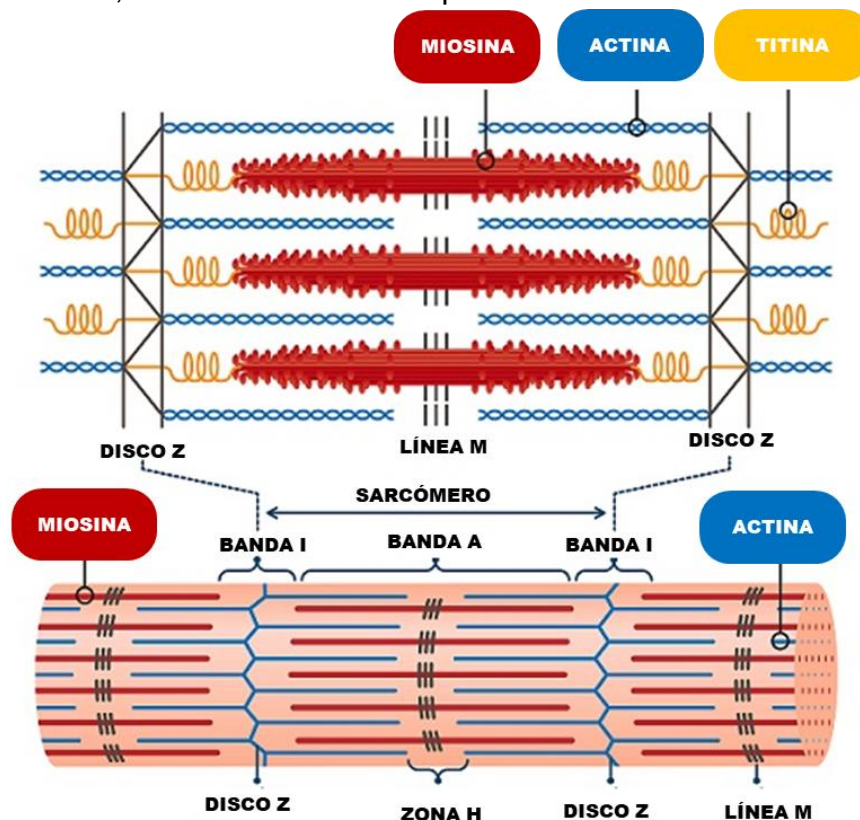
estructuras membranales que forman parte de las balsas lipídicas caracterizadas por la presencia de caveolina y que desempeñan un papel importante en la transducción de señales y que incrementan la resistencia de la membrana a la presión externa (figura 1B). En el caso del músculo esquelético en desarrollo, participan en la organización de las triadas constituidas por un túbulo T, flanqueado por dos cisternas terminales del retículo sarcoplásmico (FACMED, sf.).

Además, cada fibra muscular, contiene numerosas miofibrillas, constituidas por filamentos gruesos y delgados que forman un patrón de estriaciones; los filamentos delgados, constituidos por una proteína llamada actina, forman dímeros que se unen en la línea Z y constituyen la banda I o banda clara del patrón de estriación. La banda A (oscura), está constituida por polímeros de moléculas de miosina; ésta se encuentra bisecada por una región clara llamada banda-H, en cuyo centro se encuentra la línea-M, en la cual los filamentos gruesos se conectan a moléculas de una proteína gigante, llamada titina. Cabe señalar que los patrones de bandas claras y oscuras se repiten longitudinalmente y que el espacio comprendido entre dos líneas Z, constituye la unidad contráctil del músculo esquelético, el llamado sarcómero (Figura 2). Esto significa que cada miofibrilla está constituida por un conjunto de sarcómeros

organizados en serie y que el número de éstos determina la capacidad de la fibra muscular para generar fuerza.

Figura 2. Organización estructural de la miofibrilla (panel inferior). En el panel superior se muestra la organización estructural del sarcómero. Modificado de <https://www.registerednurses.com/skeletal-muscle-anatomy>.

En los mamíferos, el número de fibras presentes en un músculo en particular se



determina en el momento del nacimiento y cambia poco a lo largo de la vida, exceptuando casos de lesión o de enfermedad. En cambio, el número de miofibrillas puede cambiar, ya que aumenta con el crecimiento normal o con la hipertrofia inducida por el entrenamiento de fuerza; pero también puede disminuir debido a la atrofia asociada con la inmovilización, inactividad, lesión, enfermedad o vejez (Brooks, 2003).

# CONTRACCIÓN MUSCULAR

La contracción muscular es el resultado de la interacción molecular que se produce entre las proteínas (actina y miosina) que constituyen los filamentos contráctiles. Se ha explicado mediante el deslizamiento de los filamentos finos (de actina) sobre los filamentos gruesos (de miosina). La disposición de los filamentos finos, anclados en las líneas Z, determina que su deslizamiento se produzca hacia el centro del sarcómero, aproximando las líneas Z y acortando la longitud sarcomérica; siempre y cuando haya calcio en el medio. Este ion es liberado desde el retículo sarcoplásmico y se une a la subunidad C del complejo troponina. Debido a que cada miofibrilla está formada por numerosos sarcómeros, el resultado final de la contracción es el acortamiento de las miofibrillas, de la fibra muscular y del músculo completo. Cabe señalar que cuando se produce la contracción, la banda A mantiene constante su longitud, mientras que la banda I y la zona H se estrechan, lo que indica que sólo se incrementa el grado de solapamiento entre los filamentos permaneciendo constante la longitud de éstos (Cooper, 200) (Figura 3).

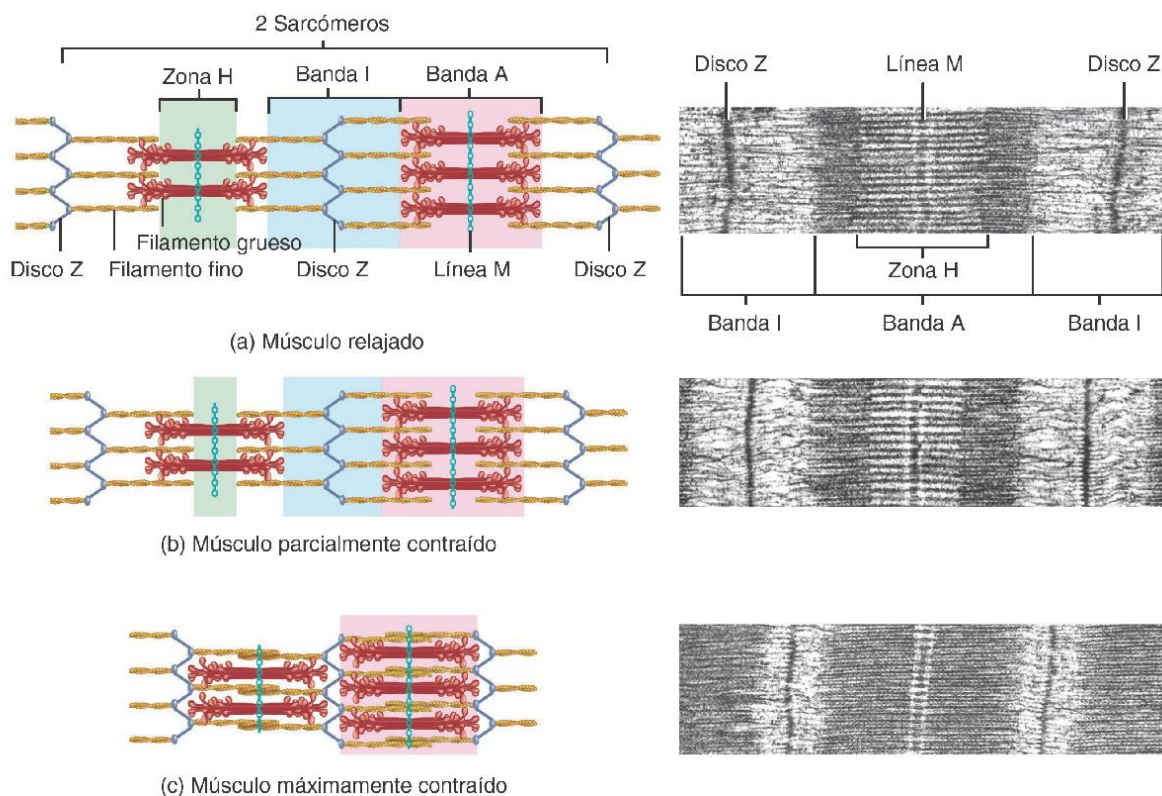


Figura 3. Durante la contracción, la banda A mantiene constante su longitud, mientras que la banda I y la zona H reducen su longitud, esto provoca que el sarcómero disminuya su longitud y en consecuencia las fibras musculares se acorten. Tomada de Tortora y Derrickson 2006.

Desde el punto de vista proteómico la miosina es el motor molecular y la principal proteína impulsora en la generación de fuerza. También es la proteína más abundante en el sarcómero que comprende alrededor del 25% de las proteínas musculares totales. Debido a su abundancia e importancia contráctil, los cambios cualitativos y cuantitativos en la miosina y sus isoformas tienen efectos significativos sobre la fuerza muscular.

La miosina está compuesta por dos cadenas pesadas (MyHC, con 230 kDa) y 4 cadenas ligeras (MyLC, con 20 kDa). La molécula tiene una región globular de doble cabeza unida a una larga cadena helicoidal de doble hebra. Cada cabeza se une a dos diferentes cadenas ligeras.

La presencia de distintas cadenas de MyHC se relaciona con la expresión de diferentes características morfológicas, energéticas y contráctiles de las fibras musculares que constituyen cada músculo. Esto explica la heterogeneidad de fibras musculares presentes en los músculos y además, permite que el músculo se adapte a las condiciones de estimulación impuestas por su entorno (Demirel *et al.*, 1999).

Los músculos de las extremidades humanas contienen tres isoformas de MyHC llamadas tipo I, tipo IIa y tipo IIx. Una fibra muscular puede expresar una sola isoforma de MyHC (es decir, fibra pura) o expresar múltiples isoformas (es decir, fibra híbrida). Los músculos de los roedores, por su parte, contienen fibras de tipo I, IIa y IIb. Las fibras de tipo I se denominan fibras de contracción lenta debido a su baja velocidad de contracción; tienen un metabolismo predominantemente oxidativo. Las fibras de tipo IIb y IIx son fibras de contracción rápida debido a su alta velocidad de contracción; metabolizan principalmente la glucosa por vía glucolítica. Las fibras de tipo IIa son fibras intermedias con velocidad de contracción rápida, su metabolismo mixto (glucolítico/oxidativo; Qaisar *et al.* 2016), por lo cual son resistentes a la fatiga.

Por otra parte, la actina también tiene un papel primordial en la actividad contráctil del músculo esquelético, ya que cuenta con sitios activos muy afines a la miosina y ambas

interactúan formando puentes cruzados, lo cual permite que ambas proteínas se deslicen una sobre otra acortando la sarcómera y desarrollando fuerza.

El movimiento de los filamentos finos (de actina) hacia el centro del sarcómero se debe a que, las cabezas miosina y los sitios activos de la actina forman puentes cruzados que se unen y se separan de manera repetida. La cabeza de miosina, una vez unida a la actina, sufre un cambio conformacional (gira  $45^\circ$ ) y jala al filamento fino hacia el centro del sarcómero.

Este movimiento produce, tanto el acortamiento del sarcómero como el desarrollo de fuerza muscular. Finalmente, en presencia de ATP, el enlace cruzado se rompe, la cabeza recupera su configuración primaria ( $90^\circ$  respecto a la actina), y si existe calcio en el medio vuelve a unirse con otro sitio activo de la actina, reiniciando el ciclo y provocando un nuevo acortamiento del sarcómero. Este proceso se conoce como teoría del deslizamiento o de los filamentos deslizantes; fue propuesta en 1954 por Huxley, Hanson y Niedergierke y nos permite explicar que el cambio en la longitud de los sarcómeros individuales, así como el desarrollo de fuerza, ocurre a medida que los filamentos gruesos y delgados se deslizan entre sí, mediante interacciones cíclicas entre las proyecciones de los filamentos gruesos de miosina y los sitios activos de actina (figura 4).

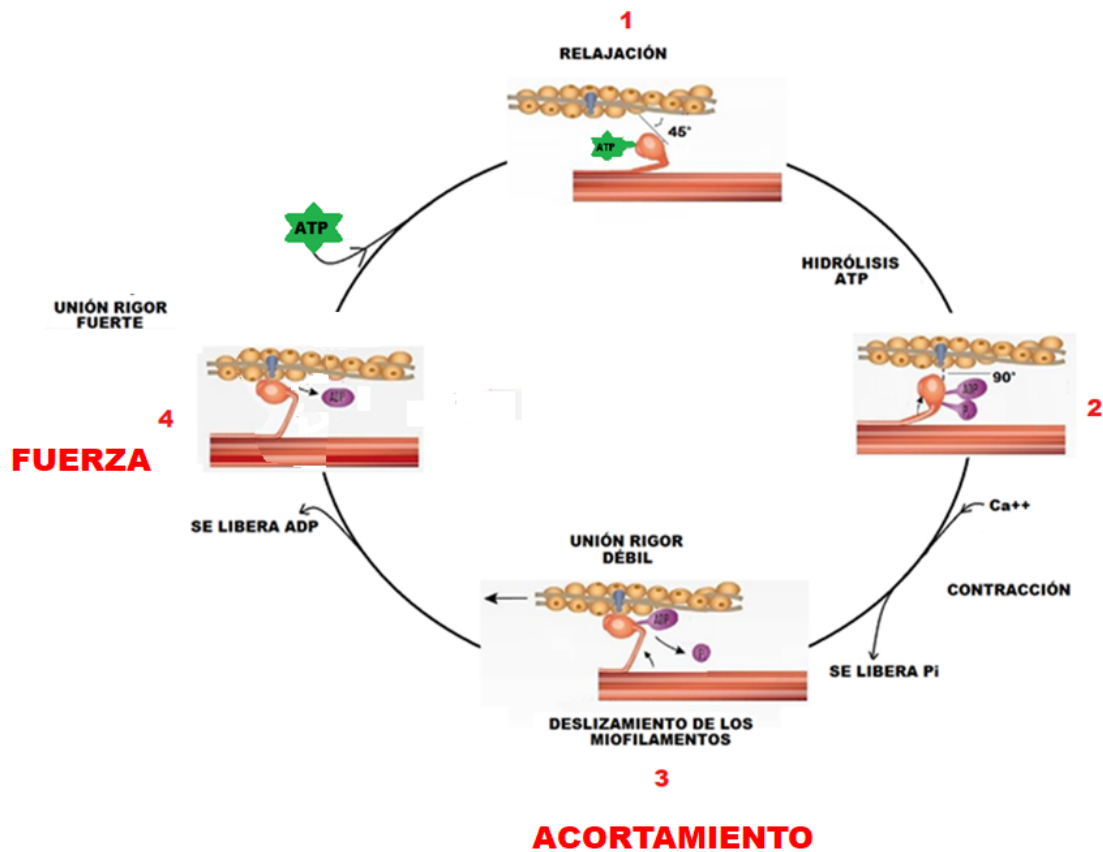


Figura 4. La actividad contráctil del músculo esquelético ocurre mediante un ciclo que inicia con el músculo está relajado, (actina y la miosina separadas; paso 1). Continúa con la hidrólisis del ATP (paso 2). En presencia de  $Ca^{2+}$ , se descubre el sitio activo de la actina, se forma el puente cruzado y ocurre el deslizamiento de los miofilamentos (paso 3). La liberación del ADP permite que el puente cruzado tenga una unión extremadamente fuerte, (desarrollo de fuerza muscular; paso 4). El rompimiento del puente cruzado ocurre en presencia de una molécula de ATP (modificado de Geeves *et al.*, 2005).

## TIPOS DE FIBRAS MUSCULARES. UNIDADES MOTORAS

Como ya se mencionó, los músculos esqueléticos de los mamíferos son de naturaleza heterogénea, lo cual significa que están constituidos por fibras musculares que presentan diferentes características estructurales, diferentes tipos de metabolismo y distintas propiedades contráctiles (figura 7).

Por otra parte, cada fibra muscular es inervada por un solo axón, pero cada axón puede inervar a decenas o cientos de fibras musculares, de esta inervación característica surge el concepto de unidad motora, ya que todas las fibras musculares inervadas por un solo axón se contraen al mismo tiempo.

La unidad motora, es la unidad funcional del sistema motor, y como se mencionó antes, está conformada por una neurona motora y un conjunto de fibras musculares con propiedades estructurales y funcionales similares, que son inervadas por dicha motoneurona (figura 6). La actividad contráctil de un músculo es controlada por una motoneurona, cuyo axón llega a la región llamada sinapsis, donde interactúa con la fibra muscular. Cuando la motoneurona se activa manda un impulso eléctrico (potencial de acción) a lo largo del axón, que en su extremo terminal libera una molécula llamada neurotransmisor, la acetilcolina, al ser liberada en la terminal nerviosa se une a receptores específicos en la membrana de la célula muscular y esto inicia un potencial de acción en el músculo. Poco después una enzima, la acetilcolinesterasa, descompone la acetilcolina para terminar la influencia nerviosa, ya que el músculo solamente genera un potencial de acción cada vez que el nervio es activado. No obstante, es importante mencionar que tanto los axones, como las fibras musculares, tienen la capacidad de transmitir potenciales de acción a frecuencias elevadas (100 Hz o más) y que este incremento en la frecuencia provoca la formación de un mayor número tanto de puentes cruzados como de mayor traslapamiento de las proteínas contráctiles.

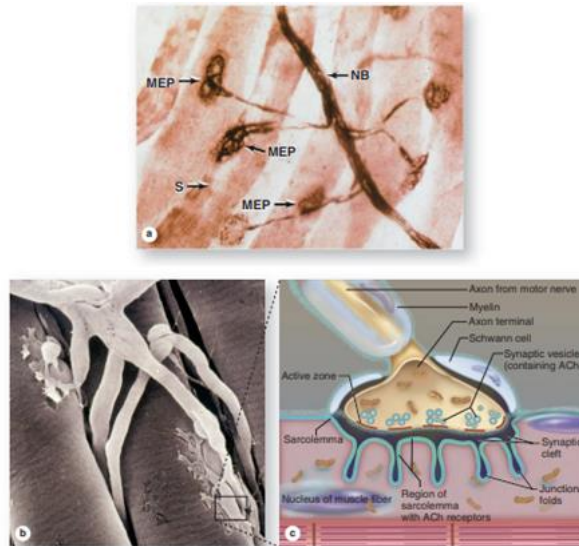


Figura 6. La placa neuromuscular está constituida por un conjunto de fibras musculares, invadas por un solo axón. Tomada de Junqueira, 2015

Cabe recordar que durante la actividad contráctil del músculo esquelético ocurre el reclutamiento selectivo de unidades motoras, lo cual permite que un músculo responda de mejor manera a las demandas funcionales, como caminar, trotar, correr o soportar cargas (ligeras, pesadas). Por otra parte, la heterogeneidad de las fibras musculares y de las unidades motoras es la base de la flexibilidad que permite utilizar el mismo músculo para diversas tareas, desde actividades continuas de baja intensidad (p. ej., postura), hasta contracciones submáximas repetidas como locomoción y movimientos rápidos (Schiaffino y Reggiani, 2011).

Existen tres tipos principales de unidades motoras, las cuales se encuentran en las extremidades y el tronco en diversas proporciones, esto depende de la especie y la asignación funcional del músculo. Morfológicamente, las fibras musculares del tipo I son de color rojo, diámetro pequeño, poseen numerosas mitocondrias y alta capacidad oxidativa; en el aspecto funcional, tienen una velocidad de contracción lenta, desarrollan escasa fuerza, pero son resistentes a la fatiga. Las del tipo IIb presentan un color pálido, son las de mayor diámetro, con escasas mitocondrias y abundante glucógeno, durante su actividad contráctil presentan una velocidad de contracción rápida, desarrollan gran cantidad de fuerza, pero fatigan muy rápido; mientras que las fibras del tipo IIa cuentan con características morfológicas intermedias entre las fibras tipo I y las tipos IIb; en el aspecto funcional presentan una



velocidad de contracción rápida, generan fuerza en cantidad intermedia y son resistentes a la fatiga (Qaisar et al, 2016) (figura 7). La diversidad de fibras musculares permite al organismo realizar tareas funcionales especializadas las fibras de tipo I son más adecuadas para ejercicios de resistencia, mientras que las fibras de tipo IIb son adecuadas para ejercicios de resistencia a corto plazo, por último, las de tipo IIa son un tipo de fibra intermedio que permite la generación de alta potencia a una velocidad considerable con buena resistencia

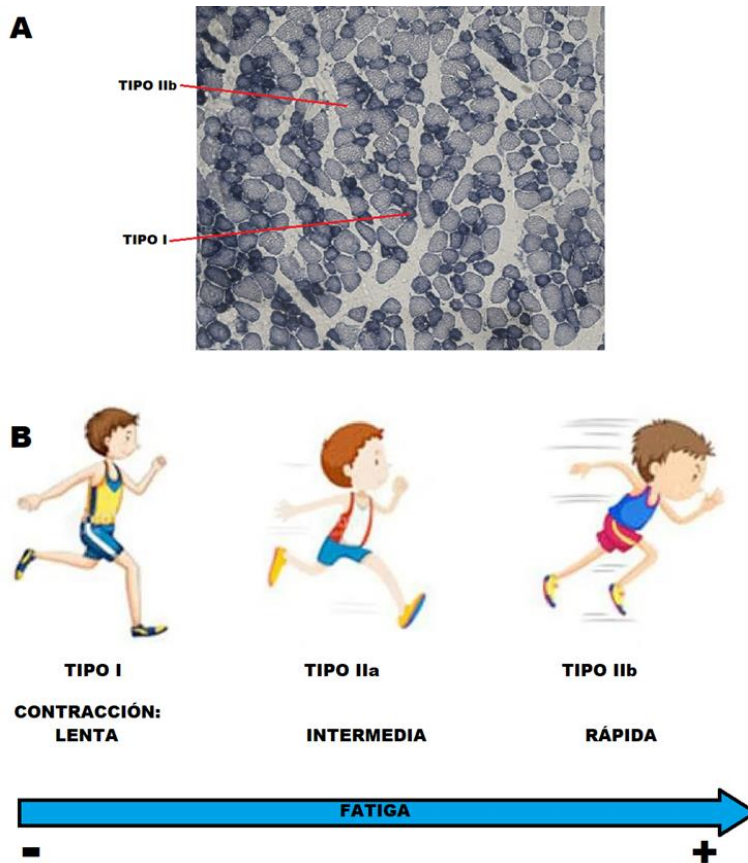


Figura 7. A) Mediante técnicas histoquímicas se pueden diferenciar las fibras musculares de contracción lenta no fatigables (tinción oscura) y las de contracción rápida fatigables (color claro); tinción con NADH-Tetrazolium tomada de Pereyra-Venegas et al.,2015. B). La predominancia de un tipo de fibra permite realizar actividades que requieren contracción continua y poca fuerza o contracción breve, pero mucha fuerza. Modificada de:

## EJERCICIO Y SU METABOLISMO

El ejercicio físico, es una actividad que preserva la salud ya que previene la aparición de enfermedades tales como la diabetes tipo 2, hipertensión y otras afecciones cardio-respiratorias.

Se ha propuesto la existencia de distintos tipos de ejercicio, basándose en aspectos mecánicos o metabólicos de la actividad muscular:

Desde el punto de vista mecánico, se habla de contracción isométrica si el músculo desarrolla fuerza, sin movimiento de las extremidades y de contracción isotónica cuando existe movimiento de las extremidades, mientras la tensión permanece estable.

En cuanto a la fuente de obtención de energía se habla de ejercicio anaeróbico, cuando el ATP utilizado durante la contracción proviene de la glucólisis anaeróbica y de ejercicio aeróbico si la fuente de energía es la vía aeróbica; el primero se realiza en ausencia de oxígeno, mientras que la aeróbica requiere de oxígeno para sintetizar ATP.

Por otra parte, la contribución relativa de las vías generadoras de ATP al suministro de energía durante el ejercicio está determinada principalmente por la intensidad y la duración de éste. Otros factores que influyen en el metabolismo del ejercicio incluyen el estado de entrenamiento, la dieta anterior, el género, la edad y las condiciones ambientales, por ejemplo durante esfuerzos muy intensos que duran segundos o durante actividades de juego intermitentes y deportes de campo, la mayor parte del ATP se deriva de la descomposición de la fosfocreatina (PCr) en Cr y Pi (durante escasos segundos) y principalmente de la transformación del glucógeno en lactato, de manera que el incremento en el uso de la glucólisis para producir ATP, así como los fuertes flujos de iones durante dicho ejercicio, dan como resultado acidosis metabólica (Hargreaves y Spriet, 2020). En cambio, si la duración del ejercicio se

extiende más allá de aproximadamente 1 min, la fosforilación oxidativa se convierte en la principal vía de generación de ATP y el glucógeno intramuscular es la fuente de combustible dominante. No obstante, cuando el ejercicio se extiende por varios minutos o incluso horas, la energía necesaria para efectuar la contracción del músculo esquelético se obtiene del metabolismo oxidativo utilizando carbohidratos y grasas como materia prima para producir ATP (Hargreaves y Spriet, 2020).

La oxidación de carbohidratos, especialmente del glucógeno muscular, es la fuente dominante para producir energía a intensidades de ejercicio altas, mientras que la oxidación de grasas es más importante a intensidades bajas. La mayor oxidación de grasas ocurre cuando el consumo de oxígeno durante el ejercicio alcanza valores entre 60-65% del  $VO_{2\text{máx}}$  (volumen máximo de oxígeno que puede procesar el organismo durante el entrenamiento físico). Cabe señalar que la oxidación de glucógeno muscular y de ácidos grasos derivados de triglicéridos intramusculares, es mayor en las primeras etapas del ejercicio, disminuyendo a medida que se prolonga la duración de este, aumentando la absorción y la oxidación de glucosa y ácidos grasos musculares (Hargreaves y Spriet, 2020).

## **EJERCICIO AERÓBICO**

Para la producción de ATP, mediante la cadena respiratoria a través del transporte de electrones en la mitocondria es necesario contar con los siguientes sustratos: equivalentes reductores en forma de NADH y  $FADH_2$ , ADP libre,  $P_i$  y  $O_2$ . Los sistemas respiratorio y cardiovascular aseguran la entrega de  $O_2$  a los músculos que se contraen, y los subproductos de la utilización de ATP en el citoplasma (ADP y  $P_i$ ) son transportados de regreso a la mitocondria para la resíntesis de ATP. (Hargreaves y Spriet, 2020).

Durante el ejercicio aeróbico, el aumento en la concentración de calcio mitocondrial activa a las enzimas isocitrato y  $\alpha$ -cetoglutarato deshidrogenasa en el ciclo del ácido tricarboxílico (TCA). La acumulación de sustrato y los reguladores locales ajustan el flujo a través de las deshidrogenasas, y una enzima, la citrato sintasa, que controla el flujo del ciclo TCA. A su vez el calcio activa la glucógeno fosforilasa y la piruvato deshidrogenasa (PDH); además el calcio contribuye al movimiento de la glucosa y de

los ácidos grasos desde la sangre hasta el interior de las células musculares, mediante el uso de proteínas de transporte localizadas en el sarcolema y en los túbulos transversos. La proteína de transporte GLUT4 facilita la entrada de glucosa a las células musculares, aumentando el suministro de glucosa, como consecuencia del aumento del flujo sanguíneo muscular durante el ejercicio. Así mismo, el metabolismo intramuscular de la glucosa asegura que el gradiente de difusión de ésta se mantenga durante la ejecución del ejercicio. (Hargreaves y Spriet, 2020).

## **DIFERENCIAS DE GÉNERO EN EL METABOLISMO.**

El género puede tener un papel importante en la regulación del metabolismo del músculo esquelético ya que existen diferencias tales como, las concentraciones de hemoglobina, la masa muscular y los niveles de hormonas reproductivas (Hargreaves y Spriet, 2020). Por ejemplo, en el caso de las mujeres, un mayor porcentaje del uso de combustible en todo el cuerpo se deriva de la grasa, y es muy probable que este efecto esté relacionado con los niveles de estrógeno circulantes. Por otra parte, las mujeres tienen una mayor proporción de fibras tipo I, menor capacidad máxima de enzimas glicolíticas y una mayor dependencia de triglicéridos intramusculares (IMTG) durante el ejercicio que los hombres, lo cual podría explicar el hecho de que las mujeres presentan concentraciones muy altas de IMTG en las fibras tipo I (Hargreaves y Spriet, 2020).

Por otra parte, una suplementación con estrógenos en los hombres disminuye la oxidación de carbohidratos y aumenta la oxidación de grasas durante el ejercicio de resistencia, lo cual, indicaría que las mujeres pueden ser más adecuadas para realizar ejercicios de resistencia que los hombres. (Hargreaves y Spriet, 2020)

Las mujeres captan y almacenan más grasa y utilizan los lípidos como combustible durante el ejercicio. La tasa de oxidación de grasas en todo el cuerpo en veinticuatro horas se ve afectada por la edad y el género. Los adultos mayores y las mujeres tienen tasas más bajas; de igual forma las mujeres absorben más triglicéridos de una comida rica en grasas que se consume después de un ayuno nocturno o 4,5 horas después de haber ingerido alimento y se incorporan más lípidos derivados del alimento en el músculo esquelético de las mujeres (Gheller et al, 2016). Así mismo,

durante el ejercicio submáximo, cuando se comparan adultos de diferentes estados de entrenamiento, las mujeres oxidan más lípidos que los hombres. También se sabe que los mecanismos subyacentes al metabolismo de las grasas favorecen una mayor absorción y metabolismo de los lípidos en el músculo femenino, lo cual posiblemente se debe al incremento reportado en la oxidación de grasas y esto, a su vez, podría relacionarse con el hecho de que las mujeres tienen más lipoproteína lipasa muscular (enzima estrechamente asociada con la tasa de hidrólisis de triglicéridos). Los niveles de ARNm de lipoproteína lipasa, son un 35 % y un 160 % mayores, respectivamente, en mujeres que en hombres. Otro posible contribuyente es que las mujeres exhiben mayores niveles de RNAm y proteína del músculo esquelético para el transportador de membrana plasmática de lípidos FAT/CD36, además, una proteína con un papel en la movilización de lípidos, la perilipina 2, también es más abundante en el músculo esquelético femenino, lo que implica que las mujeres son más capaces de usar IMCL (lípidos intramiocelular) (Gheller et al, 2016)

## **PAPEL DE CATECOLAMINAS EN EL EJERCICIO**

Las catecolaminas se componen de varios elementos que derivan del aminoácido, tirosina. Las principales catecolaminas son adrenalina (epinefrina) y noradrenalina (norepinefrina). La síntesis de éstas se da en dos niveles; terminales de fibras nerviosas simpáticas (noradrenalina) y en las células cromafines de la médula suprarrenal tanto para adrenalina como para la noradrenalina, Por otra parte, la noradrenalina se considera como un neurotransmisor y una hormona, y la adrenalina solo como una hormona. Las catecolaminas actúan permitiendo la realización y/o prolongación del ejercicio físico, de manera que, durante periodos largos de ejercicio, las catecolaminas desempeñan un papel importante en el transporte de oxígeno y sustratos energéticos hasta los músculos activos. Cuando un individuo se encuentra ejecutando algún tipo de ejercicio, las catecolaminas movilizan sustratos energéticos desde el hígado, el músculo esquelético y el tejido adiposo. Por otra parte, dichas catecolaminas estimulan al sistema cardiovascular, funcionan con sustratos energéticos y transportan oxígeno hacia los músculos activos, tanto durante el reposo como al realizar ejercicio. A este respecto, se ha reportado que el entrenamiento físico

puede influir en los receptores adrenérgicos a nivel del hígado, el músculo esquelético y el tejido adiposo. (Zouhal et al, 2008)

## ANTECEDENTES

La actividad física de intensidad baja o intermedia, pero de larga duración (ejercicio de resistencia), se caracteriza por contracciones repetidas, sostenidas y de baja intensidad durante un período prolongado de tiempo sin llegar a provocar fatiga. El término generalmente se refiere a entrenar el sistema aeróbico (ciclo de Krebs, fosforilación oxidativa) versus el sistema anaeróbico. Durante la ejecución de ejercicio de intensidad baja o intermedia la producción de fuerza es relativamente pequeña ( $\approx 30\%$ ) en relación con la capacidad máxima de generación de fuerza del músculo. Ejemplos de este tipo de ejercicio incluyen carreras de larga distancia, ciclismo y natación. El ejercicio de resistencia implica mantener una producción de potencia determinada durante el mayor tiempo posible y proporciona numerosos beneficios fisiológicos, dando como resultado cambios en la composición del tipo de fibra muscular que se limitan principalmente a las fibras de tipo IIa e implican una transformación de las fibras IIb a IIa, dando como resultado un músculo más oxidativo (Qaisar et al, 2016). Las fibras de tipo I son las más eficientes en la utilización de energía durante el ciclo de puente cruzado (es decir, requieren menor actividad de trifosfatasas de adenosina), en comparación con las fibras de tipo II y (principalmente las IIb), por lo tanto, son importantes en la eficiencia energética del músculo. En términos generales, durante la realización de ejercicio, las propiedades contráctiles de las fibras individuales, principalmente la velocidad contráctil se modifica, de manera que, las fibras de contracción rápida pueden volverse más lentas y las fibras de contracción lenta transformarse en rápidas. Estos cambios en la velocidad de contracción se atribuyen a un cambio en las isoformas de la cadena ligera de miosina de rápida a lenta y de lenta a rápida, respectivamente. (Qaisar et al, 2016).

En estudios previos, se ha mostrado que los músculos: extensor largo de los dedos (EDL) y tibial (dorsiflexores de los dedos y el tobillo, respectivamente), presentan un incremento en la fuerza desarrollada (N/g tejido) en ratas macho sometidas a nado forzado (30 minutos/día) durante tres semanas (Pineda Escalona, 2013; Requena

Islas, 2020); mientras que el músculo gastrocnemio (flexor plantar del pie, eleva el talón durante la marcha y también flexiona de la rodilla) no mostró cambios significativos en el desarrollo de fuerza en los machos sometidos al mismo tipo de ejercicio (Gutiérrez Posadas, 2017); no obstante, en los trabajos anteriores se reportó una disminución la proporción de fibras musculares de contracción rápida, lo cual pudo ser consecuencia del tipo de ejercicio al que se sometieron los animales.

Por otra parte, es interesante conocer si los resultados obtenidos en la rata macho serán similares a los registrados en ratas hembra; ya que es posible que, en estas últimas, la respuesta contráctil se vea afectada por la fase del ciclo estral en la que se encuentre el animal (ver anexo 1).

Tomando como base lo anterior, en el presente estudio deseamos conocer el efecto del ejercicio aeróbico de baja intensidad (nado forzado), sobre el músculo cuádriceps (extensor de la rodilla y flexor de la cadera) en la rata hembra.

Para ello nos hemos propuesto los siguientes:

## **OBJETIVOS:**

### GENERAL

Establecer el efecto provocado por el ejercicio aeróbico de baja intensidad, realizado durante tres semanas, sobre el patrón contráctil del músculo cuádriceps de la rata hembra joven (30 días de edad postnatal, al inicio del experimento).

### PARTICULARES:

1. Conocer si el ejercicio aeróbico provoca cambios en el peso corporal y en el del músculo cuádriceps de un lote de ratas hembra, sometidas a ejercicio aeróbico.
2. Cuantificar los tiempos de contracción y medio de relajación en el músculo cuádriceps de la rata hembra, control y sometida a ejercicio aeróbico.

3. Determinar si el ejercicio aeróbico modifica la respuesta a frecuencias crecientes del músculo en estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos antes planteados, se utilizaron 12 ratas hembra (*Rattus norvegicus*; cepa Wistar) proporcionadas por el bioterio general de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Su peso inicial osciló entre 150g y 200g. Al inicio del experimento, fueron divididos en dos lotes con 5 animales cada uno; Control (C), que permaneció sedentario en una caja de acrílico y Experimental (E) sometido a ejercicio aeróbico (nado forzado) 30 minutos diarios, durante tres semanas. Cabe señalar que los experimentos se efectuaron durante las fases metaestro o diestro del ciclo estral, debido que en éstas las hembras no presentan conducta reproductiva y son las más prolongadas del ciclo (21 y 65 horas, respectivamente).

Es importante mencionar que, durante todo el proceso experimental, los animales fueron tratados conforme a la norma NOM-062-ZOO-1999, referente al uso y manejo de animales de laboratorio. Además, debemos mencionar que para evitar que el desuso de los músculos esqueléticos pudiera provocar en las hembras control alteraciones morfológicas y funcionales, tales como pérdida de masa muscular o disminución de la fuerza contráctil (Wall y Van Loon, 2013), tanto las hembras controles como las experimentales, fueron alojados en jaulas que les permitían moverse libremente, de manera que la única diferencia entre ambos lotes fue la práctica de nado, por los organismos experimentales.

Una vez que se concluyó el periodo de entrenamiento, se efectuó el registro de la actividad contráctil del músculo en estudio, en los animales C y E. Para ello, las ratas hembra fueron pesadas y anestesiadas con uretano (1.6g/Kg de peso animal), el cual se aplicó por vía intraperitoneal; se registró continuamente el nivel de la anestesia, mediante la ausencia de reflejo palpebral.

Para acceder al músculo cuádriceps se realizó un corte longitudinal en la porción superior ventral de la extremidad posterior de la rata y se localizó dicho músculo,



utilizando un Atlas de Anatomía de la rata. Una vez localizado el músculo en estudio, se aisló del resto de la musculatura teniendo cuidado de mantener intacta la circulación sanguínea y se ató su tendón distal con un hilo indeformable.

Antes de separar el músculo cuádriceps del resto de la musculatura, se midió su longitud de reposo es decir distancia entre su origen y el inicio del tendón (sitio en el que se ató el hilo). Posteriormente, se cortó dicho tendón y mediante el hilo indeformable, se enganchó a un miógrafo isométrico (Tipo B, NarcoBiosystems), que a su vez se conectó a un amplificador (Tipo 7070, Narco Biosystems) y a un osciloscopio (Tektronix; modelo TDS 1002C-EDU), con el objeto de registrar y almacenar la actividad contráctil del músculo. Para provocar la actividad contráctil se utilizó un estimulador (NarcoBiosystems) que se conectó a un par de electrodos colocados sobre la superficie del músculo; a través de los cuales se aplicaron pulsos eléctricos (con un voltaje de 30V y 0.5 ms de duración), con frecuencias de 0.5, 5, 15, 30, 50 y 75 Hz, aplicadas durante tres segundos, cada una de ellas (figura 8).

El análisis estadístico se realizó con una prueba de t de Student  $p < 0.05$  para determinar si existía una diferencia significativa entre los pesos corporales observados en las ratas control y las que fueron sometidas a nado.

De igual forma utilizamos la prueba de T de Student  $p > 0.05$  para los pesos de los músculos cuádriceps de las ratas control y las sometidas a nado.

El área de sección transversal se calculó ( $AST = \text{peso músculo} / \text{longitud} \times \text{densidad del músculo}$ ; donde esta última es la constante 1.056 g/cm<sup>3</sup>) entre el peso del

músculo.

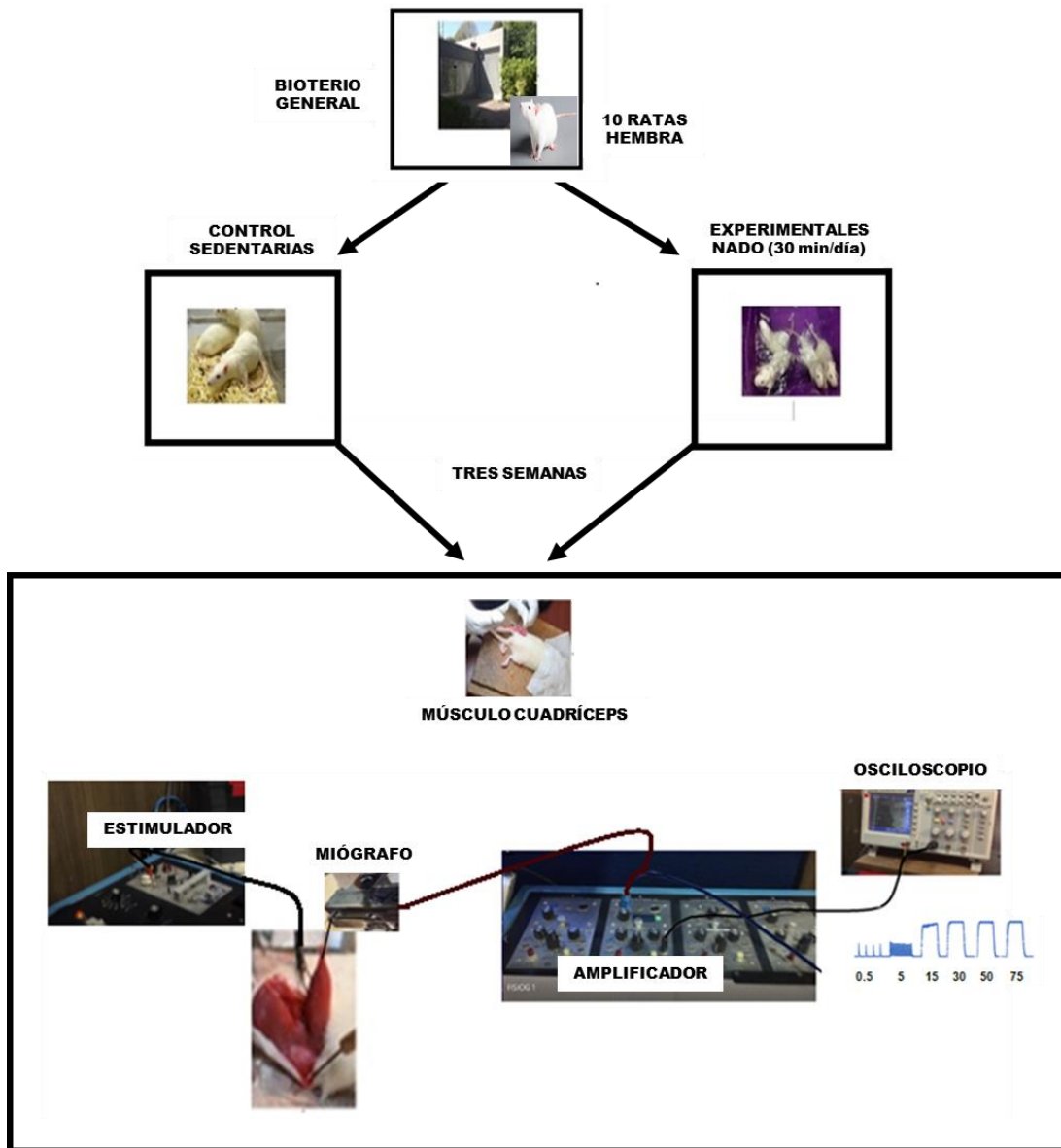


Figura 8. Diagrama de flujo que muestra los procedimientos realizados para ratas control y ratas experimentales.

## RESULTADOS

Nuestros resultados muestran que el peso corporal de las ratas control y las que fueron sometidas a nado, presentaron diferencias estadísticamente significativas (t de Student  $p < 0.05$ ), (figura 9), lo cual podría explicar que el ejercicio aeróbico ayuda a la pérdida de grasa corporal.

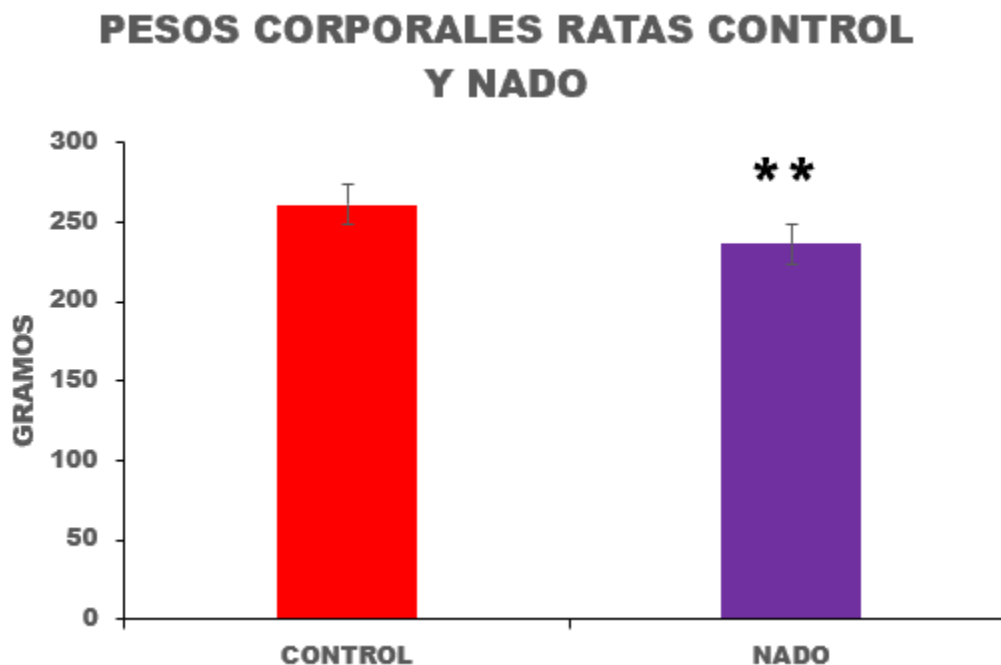


Figura 9. Pesos corporales de hembras control y sometidas a nado, muestran diferencias significativas (t de Student;  $p < 0.05$ ). Cada una de las barras representa el promedio del peso corporal de 6 ratas; las barras verticales corresponden al error estándar.

No obstante, el peso del músculo cuádriceps de las ratas hembra controles y sometidas a ejercicio aeróbico durante 3 semanas, no presentó diferencias estadísticamente significativas (t de Student,  $p > 0.05$ , figura 3A). Lo mismo ocurrió con el AST del músculo en estudio (figura 3B), lo cual muestra que las hembras sometidas a ejercicio aeróbico no perdieron masa muscular, por lo cual la pérdida de peso corporal, tal vez se relacione con la pérdida de grasa corporal.

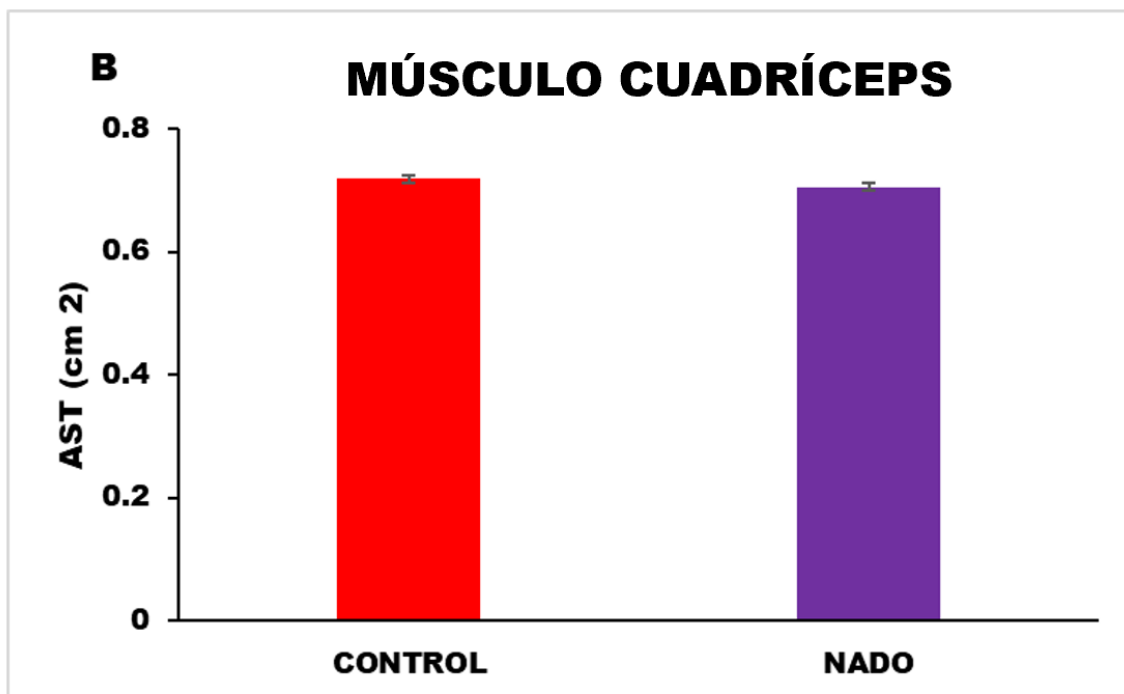
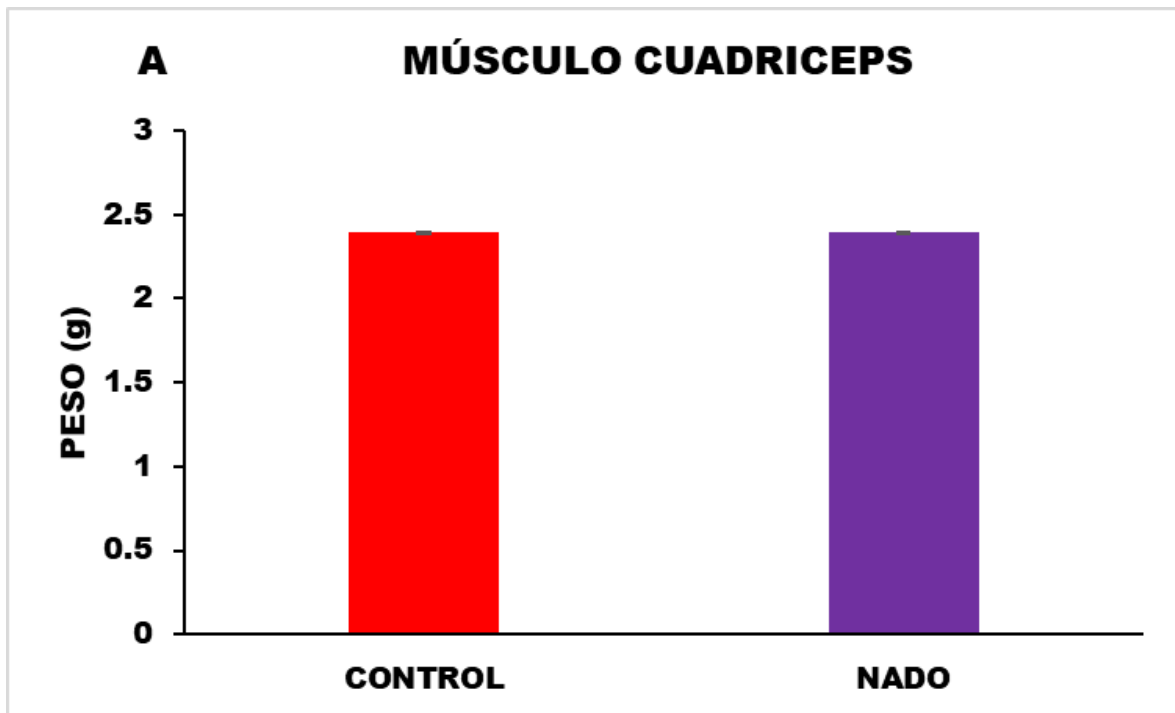


Figura 10. Peso del músculo cuádriceps de hembras control y sometidas a nado (A) y área de sección transversal del mismo músculo (B), note que en ningún caso existen

diferencias significativas (t de Student;  $p > 0.05$ ). Cada barra representa el promedio de 11 músculos; las barras verticales corresponden al error estándar.

Por otra parte, en la fuerza ejercida por las ratas control y las que fueron sometidas a nado tampoco se observaron diferencias estadísticamente significativas (t de Student,  $p > 0.05$ , figura 10). Esto indica que la función del músculo cuádriceps de las hembras estudiadas no se vio afectado por el ejercicio aeróbico, practicado durante tres semanas. Este resultado tal vez se relacione con la función que desempeña el músculo en estudio, ya que principalmente actúa como extensor de la rodilla, soportando el peso del organismo cuando se encuentra de pie y dado que durante el ejercicio efectuado este flotaba, el cuádriceps tuvo poca participación.

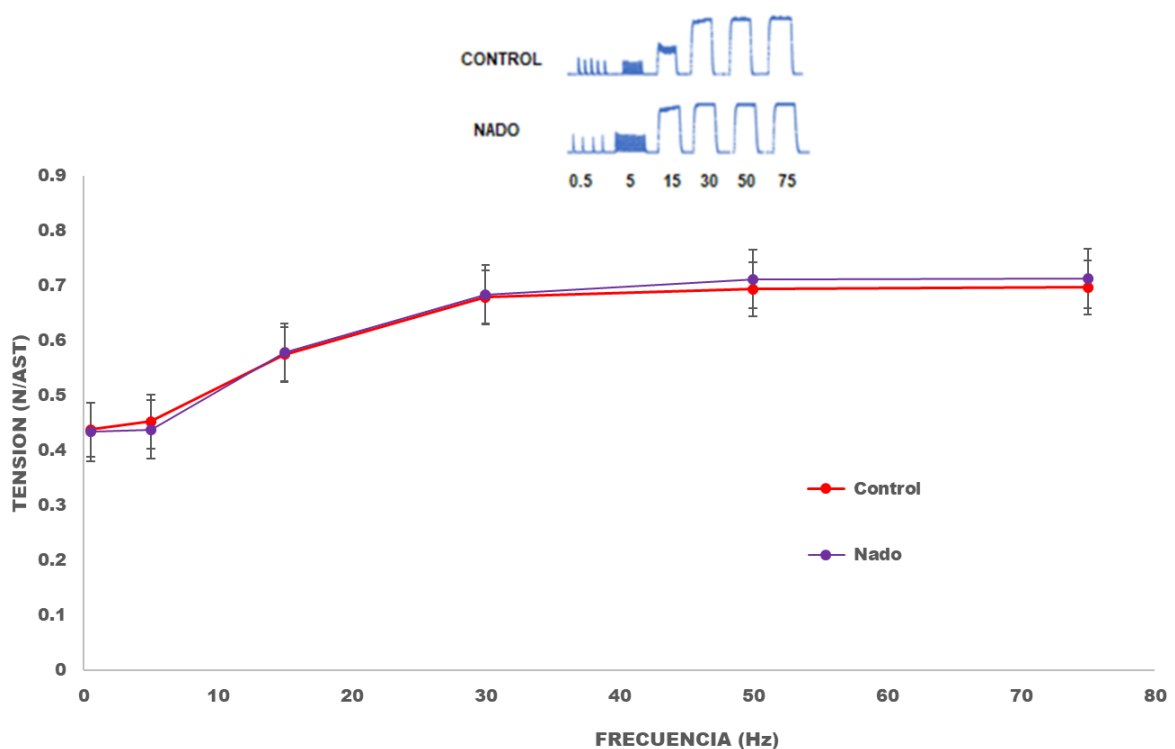


Figura 11. La tensión (N/g tejido) desarrollada por los músculos cuádriceps de hembras control y sometidas a nado, no mostró diferencias significativas (t de Student;  $p > 0.05$ ). Cada barra representa el promedio de 11 músculos; las barras verticales corresponden al error estándar.

## DISCUSIÓN

Siendo el músculo esquelético el tejido más abundante en el cuerpo de los mamíferos y uno de los más importantes en el desarrollo de pautas conductuales (ver más abajo), su estudio nos permite tener un panorama más amplio sobre los cuidados que requiere para que sus funciones se efectúen adecuadamente como tejido y además permite establecer la relación entre su actividad mecánica y los beneficios obtenidos por otros sistemas, tales como el cardiovascular, el respiratorio, incluso el nervioso y el digestivo, al realizar un ejercicio de tipo aeróbico como el que se presenta en este trabajo.

El músculo esquelético cumple con funciones muy importantes en la vida de un organismo, ya que como anteriormente se hizo mención, se encarga de la conversión de energía química en energía mecánica para de esta forma generar la fuerza requerida para que el organismo se mantenga erecto (aún en contra de la gravedad) y también para producir la potencia para flexionar y extender las articulaciones, lo cual permite al animal trasladarse de un lugar a otro. Además, almacena aminoácidos y carbohidratos, que pueden ser utilizados por el organismo no solo para la producción de energía, sino para reparar posibles daños, tanto del propio músculo como de otros tejidos; lo anterior significa que se trata de un tejido plástico que tiene la capacidad de modificar sus características estructurales y sus propiedades funcionales para adaptarse a las condiciones impuestas por su ambiente.

En el caso de animales sometidos a ejercicio aeróbico, cabría esperar un incremento en su masa muscular, debido al esfuerzo realizado durante su actividad. No obstante, nuestros resultados muestran que no hay diferencias significativas en el peso, ni en el área de sección transversal del músculo cuádriceps de la rata hembra sometida a ejercicio aeróbico durante tres semanas, respecto de los mismos parámetros de las ratas hembra control (sedentarias), en cambio el peso corporal de las hembras sometidas a nado fue significativamente menor al de las ratas sedentarias.

Para tratar de explicar nuestros resultados, cabe recordar que al realizar ejercicio aeróbico durante varios minutos o incluso horas, el metabolismo de carbohidratos y principalmente el de grasas proporcionará la mayor parte del ATP requerido para el

trabajo del músculo. El glucógeno muscular es la principal fuente de carbohidratos durante el ejercicio de intensidad moderada efectuado por tiempos breves, y su tasa de degradación (glucogenólisis) es proporcional a la intensidad relativa y la duración de dicho ejercicio (Trujillo Rodríguez, 2020). Por otra parte, las grasas son la principal fuente para producir energía cuando el ejercicio se prolonga en el tiempo (Gheller et al, 2016; Hargreaves y Spriet, 2020); esto significa, que al consumirse en su totalidad la glucosa, fuente de energía fundamental al iniciar el ejercicio y adquirida a través de los alimentos o derivada de la glucogenólisis hepática, se utilizarán como fuente energética los ácidos grasos almacenados en el tejido adiposo. Lo anterior nos permite establecer la importancia del ejercicio aeróbico como un mecanismo de control del peso corporal, principalmente evitando la acumulación de grasa, lo cual contribuirá a evitar el incremento de peso corporal y el incremento de tejido adiposo que, a la larga, pueden provocar alteraciones tales como la obesidad, la hipertensión arterial e incluso la diabetes y el síndrome metabólico (Zouhal y colaboradores, 2008).

Por otra parte, se ha reportado que, en las hembras, a diferencia de los machos, un alto porcentaje de la energía utilizada durante la actividad física deriva de las grasas (Hargreaves y Spriet, 2020). También se ha mostrado que cuentan con gran cantidad de lipasa muscular (lipoproteína), la cual se encarga de transportar lípidos hacia el interior de la fibra muscular y esto aunado a que en sus músculos existe una proteína denominada perilipina 2, cuya función es movilizar los lípidos intramiocelulares y utilizarlos como fuente energética que puede utilizarse durante la actividad muscular (Gheller *et al*, 2016), de aquí podemos deducir que la disminución registrada en el peso corporal, pero no en el área de sección transversal ni en el peso del músculo cuádriceps de las hembras sometidas a nado, se debe al incremento tanto del transporte de lípidos (procedentes de los almacenes corporales) hacia el interior de las fibras musculares, como la utilización de los mismos para obtener energía durante el ejercicio aeróbico realizado.

Todo lo anterior nos permite sugerir que el ejercicio aeróbico de resistencia puede fungir como un controlador del peso corporal, especialmente en las hembras. Esta idea se fortalece debido a que se ha reportado que la ejecución un programa de entrenamiento continuo de intensidad moderada (MICT) o un entrenamiento con

intervalos de alta intensidad alternados con intervalos de intensidad moderada (HIIT/MICT) durante 24 semanas, provocó una pérdida significativa de peso de entre 2 y 5 kg en mujeres adultas sanas (Berje *et al*, 2021). Lo anterior apoya nuestra propuesta de que la utilización de las grasas como fuente de obtención de energía, durante la práctica de ejercicio aeróbico de resistencia, provocó un decremento en su peso corporal de las hembras sometidas a nado durante tres semanas, sin modificar el peso, ni el área de sección transversal del músculo en estudio.

Por otra parte, es importante señalar que los lípidos transportados desde el tejido adiposo no solo participan en la actividad contráctil del músculo esquelético, sino que también proporcionan la energía para incrementar el gasto cardiaco y la frecuencia respiratoria, lo cual proporciona al organismo el oxígeno necesario para realizar ejercicio aeróbico. Por otra parte sabemos que los procesos aeróbicos ocurren en presencia de oxígeno, lo cual provoca un incremento en el VO<sub>2</sub> máximo del individuo, para mantener la actividad de las fibras musculares de los tipos I y IIa; y esto a su vez aumenta la capacidad de transporte de O<sub>2</sub> en el corazón, incrementando el volumen sistólico pero disminuye la frecuencia cardiaca de quien realiza este tipo de ejercicio de manera continua (Zouhal y colaboradores, 2008), lo cual explica que la enorme cantidad de lípidos incorporados al metabolismo general provoque una disminución significativa en el peso corporal de las hembras, pero se mantenga estable el peso del músculo cuádriceps.

La carencia de diferencias significativas en la fuerza desarrollada (N/g tejido) por el músculo cuádriceps de los grupos control y sometido a nado durante tres semanas, tal vez se debe a que se trata de un músculo postural (extensor), de manera que siendo el nado una actividad en la que el animal flota, se ve inhibida la acción de la gravedad, debido a que los músculos no soportan el peso del animal. Por otra parte, es útil recordar que la fuerza desarrollada por un músculo depende del número de puentes cruzados actina-miosina que se forman durante la contracción y que el número de éstos depende del área de sección transversal (AST) del músculo ( $AST = \text{peso músculo} / \text{longitud} * \text{densidad del músculo}$ ; donde esta última es la constante 1.056 g/cm<sup>3</sup>). Debido a que el ejercicio aeróbico tiene como efecto principal incrementar la resistencia sin aumentar la fuerza contráctil (Brooks, 2003), resulta



evidente que el tipo de actividad física desarrollada por nuestros animales no incrementa la fuerza muscular. No obstante, el mismo experimento realizado en ratas macho, mostró que el músculo cuádriceps de animales sometidos a nado, durante tres semanas, desarrolló menos fuerza (N/g de tejido) que los machos sedentarios (Vázquez-Barragán, datos no publicados). Esto significa que, en los músculos de los machos sometidos a ejercicio aeróbico, se ha incrementado la proporción de fibras con metabolismo oxidativo o glucolítico-oxidativo, por lo que cabría esperar que estos músculos incrementarán su tiempo de fatiga. o que las hormonas femeninas tuvieran algún efecto sobre el proceso contráctil del músculo esquelético en general y del cuádriceps en particular.

Además, el hecho de que las hembras, a diferencia de los machos, tienen un incremento moderado de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) durante la práctica de ejercicio aeróbico y en consecuencia modifican poco o nada su número de receptores adrenérgicos (Zouhal y colaboradores, 2008), podría explicar, al menos parcialmente, que sus músculos esqueléticos mantengan estables sus características morfológicas y funcionales, después de realizar este tipo de ejercicio.

No obstante, Konopka y Habert (2004), encontraron que el ejercicio aeróbico provoca la hipertrofia del músculo esquelético, tanto en hembras como en machos. Resultados similares son reportados por Brightwell y colaboradores (2019), quienes realizaron un estudio que abarcó 24 semanas de caminata, mostrando que no hubo un cambio en la masa magra de las piernas, pero sí un incremento en la fuerza del cuádriceps, de organismos humanos. Sin embargo, a diferencia de nuestros organismos experimentales (ratas adultas jóvenes), ambos grupos reportan las observaciones realizadas en personas de la tercera edad, con alta probabilidad de padecer sarcopenia, que al ser entrenados mediante ejercicio aeróbico por varias semanas incrementaron la síntesis de proteínas, mejoraron el metabolismo mitocondrial y en consecuencia aumentaron su masa muscular, además de que durante el ejercicio realizado, el cuádriceps fue estimulado por la presencia de la gravedad terrestre, mientras que durante el nado, como ya se mencionó, los músculos no están expuestos a la acción de la gravedad.

Por otra parte, se ha reportado que el incremento de la fuerza desarrollado por el músculo cuádriceps de organismos humanos, con daño muscular debido a cirugías o accidentes, ocurre cuando el ejercicio aeróbico se realiza en presencia de carga, esto es cuando el organismo soporta su propio peso, por ejemplo durante caminatas o cuando debe vencer una fuerza externa para producir movimiento de sus extremidades, como al pedalear una bicicleta (Mizner y cols., 2005); este tipo de actividad puede simularse durante el nado, aplicando una carga a la extremidad del organismo ejercitado (por ejemplo atar un peso conocido al tobillo), solo bajo esta condición un músculo postural (extensor), como el cuádriceps incrementará la fuerza desarrollada. Estos resultados corroboran nuestra hipótesis de que los músculos posturales, no modifican sus características morfológicas, ni sus propiedades contráctiles, cuando son sometidos a ejercicio aeróbico efectuado en ausencia del efecto de la gravedad.

No obstante, podría suponerse que el músculo esquelético de hembras sometidas a ejercicio aeróbico por tiempo prolongado modifica otras propiedades funcionales, entre ellas la capacidad de contraerse por tiempo prolongado, sin disminuir la fuerza desarrollada. Esto significa que podrían incrementar su tiempo de fatiga, (tiempo requerido para que la fuerza contráctil decaiga hasta el 20% de su valor inicial).

En resumen, los experimentos realizados nos permiten comprender la importancia del ejercicio aeróbico para la estabilidad del peso corporal y sugieren que la presencia de hormonas femeninas, así como la edad de los organismos, podría ser de crucial importancia en el funcionamiento del músculo esquelético.

## CONCLUSIONES

1. El ejercicio aeróbico (nado), provocó la disminución del peso corporal de la rata hembra.
2. El nado, practicado durante tres semanas, no modificó el peso, ni el AST del músculo cuádriceps de las ratas experimentales, respecto del cuantificado para las hembras control.
3. El músculo cuádriceps de las hembras sometidas a nado durante tres semanas no presentó cambios significativos, comparativamente con los organismos control, en la tensión desarrollada en respuesta a la estimulación con frecuencias crecientes.
4. El ejercicio aeróbico funge como un controlador de peso, y posiblemente ayuda a la prevención de enfermedades cardiovasculares.

## PERSPECTIVAS.

Con el presente trabajo observamos que existe una relación entre la pérdida de peso y un ejercicio como el nado, por lo que podría emplearse este tipo de ejercicio para intentar reducir el peso corporal de animales obesos o con sobrepeso, especialmente hembras.

Se podría realizar una variante en la cual los sujetos experimentales ingieran alimento en diferentes tiempos (10 min, 3 o más horas) antes de realizar el nado y observar las diferencias de peso corporal que se presenten entre los grupos experimentales al final del período de entrenamiento.

También se podría probar la ejecución de ejercicio aeróbico en presencia de la gravedad, para ello se puede entrenar a un lote de ratas en una caminadora o bien atar pesos conocidos al tobillo de los organismos sometidos a nado.

De igual forma se podría hacer un nuevo estudio, pero ahora tomando en cuenta factores como la hora del día, realizando nados por la mañana, tarde o noche y de

esta forma establecer si el metabolismo aeróbico y la actividad contráctil asociada a este, presenta ritmo circadiano.

También es importante comparar el tiempo de fatiga del músculo cuádriceps de la rata hembra sometida a ejercicio aeróbico, con el de las hembras control y establecer si este tipo de ejercicio mejora la capacidad de realizar actividad mecánica por tiempo prolongado. Así mismo se podría comparar el tiempo de fatiga del músculo cuádriceps de machos control y sometidos a nado y el de hembras control y sometidas a nado con el de machos, sometidos al mismo tratamiento.

Finalmente se podrían realizar tinciones histológicas o histoquímicas que permitan conocer si los músculos de animales entrenados con nado o en una caminadora presentan signos de remodelación, tales como incrementos en su irrigación, presencia de núcleos centrales, aumento o disminución en su contenido de grasa muscular.

También se puede comparar la cantidad de grasa corporal de animales (machos y hembras), controles y entrenados con ejercicio aeróbico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berge, J., Hjelmessaeth, J., Hertel, J. K., Gjevestad, E., Småstuen, M. C., Johnson, L. K., Martins, C., Andersen, E., Helgerud, J., & Støren, Ø. (2021). Effect of Aerobic Exercise Intensity on Energy Expenditure and Weight Loss in Severe Obesity-A Randomized Controlled Trial. *Obesity (Silver Spring, Md.)*, 29(2), 359–369. <https://doi.org/10.1002/oby.23078>
- Brightwell, C. R., Markofski, M. M., Moro, T., Fry, C. S., Porter, C., Volpi, E., & Rasmussen, B. B. (2019). Moderate-intensity aerobic exercise improves skeletal muscle quality in older adults. *Translational sports medicine*, 2(3), 109-119. <https://doi.org/10.1002/tsm2.70>
- Brooks, S. V. (2003). CURRENT TOPICS FOR TEACHING SKELETAL MUSCLE PHYSIOLOGY. *Advances in Physiology Education*, 27(4), 171–182. <https://doi.org/10.1152/advan.2003.27.4.171>
- Cooper, G. M. (2000). Actin, Myosin, and Cell Movement. The Cell - NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9961/#:~:text=Muscle%20contraction%20thus%20results%20from,motor%20that%20drives%20filament%20sliding>
- Demirel, H. A.; Powers, S. K.; Naito H.; Hughes M. & Coombes, J. S. 1999. Exercise-induced alterations in skeletal muscle myosin heavy chain phenotype: dose-response relationship. *J. Appl. Physiol.*, 86:1002-1008.
- FACMED, UNAM. (s. f.). II. MORFOLOGÍA DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO. Recuperado 8 de febrero de 2024, de <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/Textos/MuscAnatomia.html>
- Frontera, W. R., & Ochala, J. (2014). Skeletal Muscle: A brief review of Structure and function. *Calcified Tissue International*, 96(3), 183-195. <https://doi.org/10.1007/s00223-014-9915-y>
- Geeves MA, R.Fedorov y DJ.Manstein. 2005. Molecular mechanism of actomyosin- based motility. *Cell Mol. Life Sci.* 62:1462-1477.

- Gheller, B., Riddle, E., Lem, M. R., & Thalacker-Mercer, A. (2016). Understanding Age-Related changes in skeletal muscle Metabolism: Differences between females and males. *Annual Review of Nutrition*, 36(1), 129-156. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071715-050901>
- Gutiérrez-Posadas E. (2017). "Efecto del ejercicio aeróbico sobre la respuesta mecánica y la proporción de fibras glucolíticas del músculo gastrocnemio de la rata macho Tesis de Licenciatura. FES-Iztacala, UNAM.
- Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature Metabolism*, 2(9), 817-828. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>
- Horowitz, J. F., Mora-Rodríguez, R., Byerley, L. O., & Coyle, E. F. (1997). Lipolytic suppression following carbohydrate ingestion limits fat oxidation during exercise. *Am J Physiol*, 273(4), E768-E775. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1997.273.4.e768>
- [https://www.google.com/search?q=tipos+de+fibras+musculares&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi7tJr8srz2AhXJJ0QIHYP4BVUQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=656&dpr=1.25#imgrc=mYZj\\_FtNv9cf4M](https://www.google.com/search?q=tipos+de+fibras+musculares&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi7tJr8srz2AhXJJ0QIHYP4BVUQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=656&dpr=1.25#imgrc=mYZj_FtNv9cf4M)
- <https://www.udocz.com/apuntes/60758/histologia-basica-texto-y-atlas-junqueira-carneiro-booksmedicosorg-1>
- Hubscher, C., Brooks, D., & Johnson, J. (2005). A quantitative method for assessing stages of the rat estrous cycle. *Biotechnic & Histochemistry*, 80(2), 79–87. <https://doi.org/10.1080/10520290500138422>
- Kiens, B. (2006). Skeletal Muscle Lipid Metabolism in Exercise and Insulin Resistance. *Physiological Reviews*, 86(1), 205-243. <https://doi.org/10.1152/physrev.00023.2004>
- Konopka, A. R., & Harber, M. P. (2014). Skeletal muscle hypertrophy after aerobic exercise training. *Exercise and sport sciences reviews*, 42(2), 53–61. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000007>

- Marcondes, F. K., Bianchi, F. J., & Tanno, A. P. (2002). Determination of the estrous cycle phases of rats: some helpful considerations. *Brazilian Journal of Biology*, 62(4a), 609–614. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842002000400008>
- Mizner RL, Petterson SC y Snyder-Mackler L. (2005). Quadriceps strength and the time course of functional recovery after total knee arthroplasty. *J Orthop Sports Phys Ther.* 35: 424-436.
- Pereyra-Venegas J, Segura-Alegría B, Guadarrama-Olmos JC, Mariscal-Tovar S, Quiróz-González S & Jiménez-Estrada I. (2015). Effects provoked by chronic undernourishment on the fibre type composition and contractility of fast muscles in male and female developing rats. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 99:974-986. doi: 10.1111/jpn-12274.
- Pineda Escalona, Lezly. (2013). "Efecto de la actividad física de resistencia sobre las propiedades contráctiles del músculo extensor largo de los dedos (edl) de la rata macho". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/369305>
- Qaisar, R., Bhaskaran, S., & van Remmen, H. (2016). Muscle fiber type diversification during exercise and regeneration. *Free Radical Biology and Medicine*, 98, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.03.025>
- Ramos-Fernández de Henestrosa (2020). Estructura y función de las caveolas. Universidad de la Laguna.
- Requena-Islas E. (2020) Efecto del ejercicio aeróbico sobre las propiedades contráctiles y la captación de carbohidratos en el músculo tibial de la rata macho. Tesis para obtener el título de Bióloga. Los Reyes Iztacala Edo. de México
- Schiaffino, S., & Reggiani, C. (2011). Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles. *Physiological Reviews*, 91(4), 1447–1531. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2010>

- Trujillo Rodríguez, A. (2020). VÍAS METABÓLICAS Y ENTRENAMIENTO DEPORTIVO. Revista Cubana de Medicina del Deporte y la Cultura Física, 7(2). Recuperado de <https://revmedep.sld.cu/index.php/medep/article/view/257/275>
- Wall, BT y van Loon, LJ (2013), Estrategias nutricionales para atenuar la atrofia muscular por desuso. Nutr Rev, 71: 195-208. <https://doi.org/10.1111/nure.12019>
- Zouhal, H., Jacob, C., Delamarche, P., & Gratas-Delamarche, A. (2008). Catecholamines and the effects of exercise, training and gender. Sports Medicine, 38(5), 401-423. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838050-00004>







## ANEXO 1

### CICLO ESTRAL

El ciclo reproductivo de las ratas hembra se denomina ciclo estral y se ha dividido en: proestro, estro, metaestro (o diestro I) y diestro (o diestro II); está bajo control fotoperiódico. La ovulación ocurre desde el comienzo del proestro hasta el final del estro. Desde el inicio de la madurez sexual hasta los 12 meses de edad, la duración media del ciclo en la rata hembra es de 4 días, y esta breve duración del ciclo convierte a la rata en un animal ideal para la investigación de los cambios que ocurren durante el ciclo reproductivo. Durante el ciclo estral, la prolactina, LH y FSH se mantienen bajas y aumentan en la tarde de la fase de proestro. Los niveles de estradiol comienzan a aumentar durante el metaestro, alcanzando niveles máximos durante el proestro y regresando a la línea de base en el estro. La secreción de progesterona también aumenta durante el metaestro y el diestro, con una disminución posterior. Luego, el valor de progesterona aumenta para alcanzar su segundo pico hacia el final del proestro (Marcondes et al, 2002). El ciclo estral se considera irregular cuando las etapas no están en secuencia o cuando una sola etapa dura de 4 a 5 días. La etapa del ciclo se puede determinar observando a bajo aumento microscópico una muestra de células obtenidas de la superficie del epitelio vaginal. Las capas de la mucosa vaginal incluyen el estrato córneo, el estrato granuloso, la red mucosa y el estrato germinativo. Las diferencias cíclicas en la citología vaginal ocurren en respuesta a los cambios morfológicos del epitelio vaginal a medida que las células se descaman. La etapa de proestro de 12 a 14h se caracteriza por células nucleadas redondas de tamaño uniforme. Durante esta etapa, el epitelio vaginal se compone de 9 a 12 capas de células con células maduras en la superficie. Al final del proestro, la capa superficial de células epiteliales maduras se ha desprendido y el estrato córneo queda expuesto. La siguiente etapa, el estro, dura de 25 a 27h y se distingue por la aparición de células cornificadas no nucleadas de forma irregular. Durante la siguiente etapa, metaestro, que dura de 6 a 8h, los leucocitos se infiltran en el epitelio vaginal adelgazado debido a una disminución en la secreción de estrógenos y pasan al canal

vaginal. Las secreciones vaginales hacen que el frotis parezca blanco y opaco. Durante el diestro, que dura de 55 a 57 h, más de la mitad del ciclo, el epitelio alcanza su punto más delgado (4-7 capas). Es durante esta etapa que la degeneración del epitelio se detiene y la altura del epitelio aumenta nuevamente debido a la mitosis. Tanto los leucocitos como las células nucleadas están presentes durante esta fase. (Hubscher et al 2005).

Etapa del ciclo	Genitalia externa	Descripción del frotis	Cuadro histológico	Conducta	Duración
Estro	Labios engrosados. Vagina seca.	Gran cantidad de células epiteliales queratinizadas o escamosas		Calor sexual lordosis Aceptación del macho	25 a 27 horas
Metaestro	Labios ligeramente engrosados	Buena cantidad de leucocitos y pocas células epiteliales.		Ovulación No hay calor sexual (No hay aceptación del macho)	6 a 8 horas
Diestro	Labios no engrosados. Vagina húmeda.	Mayoría de leucocitos, pocas células epiteliales y muy pocas nucleadas		No hay calor sexual (no hay aceptación del macho)	55 a 57 horas
Proestro	Labios ligeramente engrosados Vagina seca	Gran cantidad de células nucleadas y pocos leucocitos		Puede ocurrir calor sexual (aceptación del macho)	12 a 14 horas

### Células nucleadas



### Células escamosas



Figura A1. Cuadro resumen del ciclo estral de la rata (Modificado de Olvera , sf.)