

**DETERMINACIÓN DEL UMBRAL VENTILATORIO Y ANAERÓBICO A
TRAVÉS DEL MODELO MATEMÁTICO DE WEBER-FECHNER DE LA
PSICOFÍSICA**

DANILO ENRIQUE RAMÍREZ SANTACRUZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE - MELÉNDEZ
INSTITUTO DE EDUCACIÓN Y PEDAGOGÍA
LICENCIATURA EN EDUCACIÓN FÍSICA Y DEPORTES
SANTIAGO DE CALI**

2018

**DETERMINACIÓN DEL UMBRAL VENTILATORIO Y ANAERÓBICO A
TRAVÉS DEL MODELO MATEMÁTICO DE WEBER-FECHNER DE LA
PSICOFÍSICA**

**DANILO ENRIQUE RAMÍREZ SANTACRUZ
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN
EDUCACIÓN FÍSICA Y DEPORTES**

DIRECTOR: CARLOS ALEJANDRO LÓPEZ ALBÁN

**UNIVERSIDAD DEL VALLE - MELÉNDEZ
INSTITUTO DE EDUCACIÓN Y PEDAGOGÍA
LICENCIATURA EN EDUCACIÓN FÍSICA Y DEPORTES
SANTIAGO DE CALI**

2018

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS	6
ABREVIATURAS.....	7
RESUMEN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. MARCO TEORICO	11
2.1 TRANSFERENCIA DE ENERGIA EN LOS SISTEMAS BIOLOGICOS.....	11
2.2 ESTADOS METAESTABLES METABOLICOS.....	12
2.3 EL INPUT, LA ENERGIA POTENCIAL.....	13
2.3.1 Carbohidratos	13
2.3.2 Lípidos	14
2.3.2.1 Los ácidos grasos (AG).....	15
2.3.2.2 Los triglicéridos	15
2.3.2.3 Las lipoproteínas.....	16
2.3.2.4 El colesterol	17
2.3.3 Proteínas	17
2.4 PROCESOS ENERGÉTICOS EN EL CITOSOL CELULAR.....	17
2.4.1 La vía glucolítica.....	18
2.4.2 Activación de los ácidos grasos.....	20
2.5 PROCESOS ENERGETICOS AL INTERIOR DE LA MITOCONDRIA	21
2.5.1 Conversión de piruvato a acetil-CoA.....	21
2.5.2 Lanzadera de la carnitina	22
2.5.3 La beta-oxidación	22
2.5.4 Desaminación y transaminación de los aminoácidos.....	22
2.5.5 Ciclo de Krebs o Ciclo del Ácido Cítrico	23
2.5.6 Cadena transportadora de electrones y fosforilación oxidativa.....	25
2.6 VIA DE LOS FOSFAGENOS	26
2.7 MEDICIÓN DE LOS PROCESOS ENERGETICOS.....	26
2.7.1 Calorimetría directa e indirecta para la medición del gasto energético en humanos	26
2.7.2 Medición del gasto energético mediante el consumo de oxígeno	28

2.7.2.1	Consumo máximo de oxígeno (VO_{2max})	29
2.7.2.2	Test Ergométricos	30
2.7.3	Medición del gasto energético en unidades mecánicas	30
2.7.4	Medición del metabolismo energético mediante Umbrales	32
2.7.4.1	Umbral anaeróbico: determinación por medición de lactato en sangre	33
2.7.4.2	Umbral ventilatorio: determinación por intercambio gaseoso	35
3.	MARCO REFERENCIAL	39
3.1	PSICOFISICA.....	39
3.2	METODOS DE LA PSICOFISICA CLASICA O INDIRECTOS.....	40
3.2.1	Método de los límites o mínimos	40
3.2.2	Método de los estímulos constantes.....	44
3.2.3	Método de ajuste o error promedio	45
4.	OBJETIVOS.....	45
4.1.	OBJETIVO GENERAL	45
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
5.	METODOLOGÍA	46
5.1.	TIPO DE ESTUDIO	46
5.2.	ESTRATEGIAS DE INVESTIGACIÓN	46
5.3.	ÁREA DE ESTUDIO	47
5.4.	POBLACIÓN	47
5.5.	VARIABLES	47
5.5.1.	Variables sociodemográficas.....	47
5.5.2.	Variables antropométricas.....	48
5.5.3.	Variables de la prueba incremental	48
5.5.4.	Variables fisiológicas medibles durante la prueba incremental y la recuperación pasiva.....	49
5.6.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	52
5.7.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	53
5.8.	ASPECTOS ÉTICOS	54
6.	CONCLUSIONES.....	56
7.	BIBLIOGRAFIA.....	58
ANEXOS		63

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia:

A mis padres por ser ese pilar que me permitió cumplir con este logro de vida. Por su gran apoyo y amor incondicional que me han brindado a lo largo de los años y me ha dado la seguridad y tranquilidad para poder formarme como ser humano y profesional. A ustedes les debo mi vida, mis logros y todo lo que hoy soy.

A mis abuelos por ser ese soporte que me permitió ir avanzando paso a paso resguardándome en sus cuidados y atenciones. A mi abuela Marlene Villano, por enseñarme que el amor viene acompañado de fortaleza y firmeza, por acogerme y cuidarme con el mayor amor del mundo.

A mi abuelo Luis Enrique Ramírez, por ser el bastón de apoyo para toda su familia, por ser ese ejemplo de perseverancia y constancia.

A mi abuela Matilde Guevara, porque gracias a su gran fortaleza durante el trayecto de su vida hoy estoy aquí cumpliendo este gran sueño.

A mis tíos tía Milena y Tío Jairo, por acogerme como a un hijo más y brindarme todo su cariño y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis Carlos Alejandro López Albán:

Por la gran disposición y voluntad para atender mis inquietudes. Por compartir su conocimiento y proporcionarme bases sólidas para mi desarrollo como profesional. Por el apoyo que me brindo a lo largo de la elaboración de este proyecto. Por su gran interés en formar profesionales competentes.

A la Pontificia Universidad Javeriana y mis jefes inmediatos en el Centro Deportivo Loyola por ser un lugar de crecimiento profesional y de gran calidad humana. A Martha Cecilia Gómez y Ana María Soto por su apoyo, por creer en mí, por su amistad, su cariño y hacerme sentir en casa.

A mi familia en general:

Por acompañarme en este proceso de vida y ser mi fuente de tranquilidad y amor incondicional.

ABREVIATURAS

FC	Frecuencia Cardíaca
ATP	Adenosín Trifosfato
ADP	Adenosín difosfato
AMP	Adenosín monofosfato
NAD	Nicotinamida adenina dinucleotido
FAD	Flavina adenina dinucleotido
O_2	Oxígeno
CO_2	Dióxido de carbono
PCr	Fosfocreatina
Kcal	Kilocaloría
MET	Equivalente metabólico
V_E	Ventilación por minuto
VC	Volumen corriente
VO_2	Consumo de Oxígeno
$VO_{2\text{máx}}$	Consumo de Oxígeno Máximo
VCO_2	Producción de Dióxido de carbono
RQ	Cociente respiratorio
V_E/VO_2	Equivalente ventilatorio para el Oxígeno
V_E/VCO_2	Equivalente ventilatorio para el Dióxido de carbono
$PaCO_2$	Presión parcial de dióxido de carbono
FEO_2	Fracción de oxígeno en el aire espirado
$P_{ET}O_2$	Presión parcial de O_2 en el aire final de la espiración
UA	Umbral anaeróbico
UB	Umbral ventilatorio
Uabs	Umbral Absoluto
Ud	Umbral Diferencial
ES	Estímulo estándar

EV	Estimulo variable
II	Intervalo de incertidumbre
PIS	Punto de igualdad subjetiva

RESUMEN

Planteamiento del problema. La evaluación del Umbral anaeróbico (UA) y Umbral Ventilatorio (UV) son métodos que se utiliza para la prescripción de ejercicio y la rehabilitación cardiopulmonar. ¿Es posible medir el Umbral Ventilatorio y el Umbral Anaeróbico usando el modelo matemático de la psicofísica conocido como Ley de Weber-Fechner?

Objetivo. Analizar la ventilación (V_E), el consumo de oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) el cociente respiratorio (RQ), los equivalentes ventilatorios para el CO_2 y el O_2 , concentración de lactato en sangre mediante el modelo matemático psicofísico conocido como Ley de Weber-Fechner usando el método de los límites para la determinación del UV y el UA.

Metodología.

1. Delimitación del área de estudio.
2. Recolección de información sobre termodinámica y bioenergética, metabolismo energético, UA, Psicofísica, Ley de Weber-Fechner y Umbrales sensoriales, aclaramiento de lactato, función pulmonar, intercambio gaseoso y Umbral Ventilatorio en fuentes bibliográficas como libros y artículos de revistas electrónicas.
3. Planteamiento del problema.
4. Desarrollo de la Hipótesis: Los Umbrales metabólicos: UA y UV pueden establecerse analizando el intercambio gaseoso y el comportamiento de lactato en sangre durante la aplicación de un estímulo de entrada (cargas incrementales) durante una prueba de esfuerzo y la respuesta en cargas descendentes (estimulo de salida) analizando los datos con el Modelo estadístico de los límites procedente de la ley psicofísica planteada por Ernst Heinrich Weber y Gustav Theodor Fechner para la determinación de los umbrales sensoriales.
5. Escritura del marco teórico a partir de la Teoría General de Sistemas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La medición de los procesos energéticos celulares puede llevarse a cabo mediante diferentes metodologías que involucran diversas variables fisiológicas. En el rendimiento deportivo al igual que en el marco de la salud la determinación del estado metabólico y de la capacidad funcional de un individuo se puede inferir a partir de la determinación de los umbrales metabólicos siendo los dos principales el Umbral Anaeróbico (UA) y el Umbral ventilatorio (UV). Aunque estos umbrales se han definido como análogos, la diferencia entre ellos radica principalmente en el método que se usa para su medición. El UA se establece principalmente mediante la medición de las concentraciones de lactato en sangre durante una prueba ergométrica, mientras que el UV se determina a partir del análisis en el intercambio gaseoso durante una prueba espiroergométrica.

En la psicofísica, mediante el modelo de Weber-Fechner se relacionan los valores de entrada y los valores de salida a partir de un modelo matemático para conocer el Umbral Absoluto (Uabs) del estímulo. La medición del UV Y UA se ha determinado solo con las cargas de entrada (cargas incrementales) a partir del comportamiento de los gases y su relación con la ventilación durante un test espiroergométrico, además de la medición de las concentraciones de lactato en sangre. No hemos encontrado determinación del UV y UA analizando la relación de los valores obtenidos en pruebas donde se obtengan datos del intercambio gaseoso y las concentraciones de lactato en sangre durante un test incremental (valores de entrada) y recuperación pasiva post test (valores de salida), por lo cual proponemos una revisión teórica del modelo matemático psicofísico aplicado en los umbrales sensoriales en la determinación de los umbrales metabólicos (UV y UA) asociados al estímulo mecánico del ejercicio para resolver la pregunta: ¿es posible medir el Umbral Ventilatorio y el Umbral Anaeróbico usando el modelo matemático de la psicofísica conocido como Ley de Weber-Fechner?

2. MARCO TEORICO

2.1 TRANSFERENCIA DE ENERGIA EN LOS SISTEMAS BIOLOGICOS

Los procesos de transferencia de energía garantizan la conservación de la vida de los organismos. Los sistemas biológicos toman la energía potencial del medio externo. Las plantas lo hacen en forma de energía lumínica la cual transforman en energía química mediante la fotosíntesis. En los animales el input de energía potencial se hace a través de sustratos (Carbohidratos, Lípidos y Proteínas). Estos compuestos carbonados son utilizados por los seres humanos como combustible energético durante el reposo y el ejercicio físico. Los procesos de transformación de energía en los seres vivos cumplen con la primera y con segunda ley de la termodinámica.

Cuando los compuestos carbonados son ingeridos en forma de macronutriente, una vez dentro del sistema, los procesos metabólicos del cuerpo transfieren la energía a compuestos que conservan parte de esta energía contenida en sus enlaces. La transferencia energética es el resultado de una serie de reacciones acopladas las cuales se encargan de sustraer la energía química que ingresa al organismo y transferirla a las zonas donde se demande energía, en pro de satisfacer alguna de las formas del trabajo biológico (trabajo mecánico, trabajo químico, trabajo de transporte) (McArdle, Katch y Katch, 2015).

La energía potencial que ingresa como input no es de la misma magnitud de la que sale. Durante los procesos un porcentaje de esta energía transferida se libera en forma de calor que se disipa en el sistema (McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009). Esta magnitud neta de calor es la entropía. La suma de la energía transferida y el calor disipado es igual a la energía potencial inicial (input) que ingreso al sistema por lo cual se cumple la Ley de la conservación de la energía. La entropía en forma de calor afecta la estabilidad del sistema. Disipar el calor genera una cadena de bucles de retroalimentación para mantener la homeostasis. La entropía en este caso es también información para el sistema.

2.2 ESTADOS METAESTABLES METABOLICOS

En los procesos que ocurren dentro del sistema, todas las reacciones se encuentran acopladas entre sí, catalizadas enzimáticamente y controladas por la oferta y demanda energética del organismo, aumentando su velocidad o disminuyéndola según el estado metaestable del sistema.

Según Verhoshansky y Siff (2000) “el término «metaestabilidad» se refiere a un estado que persiste hasta que se produce un trastorno que hace pasar a otro estado de estabilidad” (p. 548). Cada exigencia física demanda un estado metaestable diferente, la necesidad energética cambia para cada estado, lo cual genera que el sistema se ajuste a las condiciones que se le presentan y modifique su respuesta de manera oscilatoria. Todo sistema tiende a volver a su estado estable inicial.

La finalidad de la respuesta del organismo frente a demandas energéticas es sintetizar fosfatos de alta energía a partir de los precursores energéticos, siendo el más relevante el ATP (López y Fernández, 2006), por su capacidad de extraer y donar energía en la mayor cantidad de reacciones químicas del organismo (McArdle et al., 2015).

El mecanismo de producción de ATP está regulado en las mitocondrias por la disponibilidad de ADP como sustrato de fosforilación, es decir, por las demandas energéticas celulares, ejerciendo el mayor efecto en las enzimas que limitan la velocidad que controla el metabolismo energético de macronutrientes (McArdle et al., 2015).

Cuando la célula aumenta su gasto energético para suplir las demandas funcionales, las concentraciones de ATP empiezan a disminuir y las concentraciones de ADP aumentan en la célula, esto produce un incremento en la tasa respiratoria con el fin de proporcionar O_2 a la mitocondria para la regeneración de ATP, se aumenta la velocidad de la transferencia de electrones y por ende la fosforilación oxidativa; se incrementa la velocidad de oxidación del piruvato durante el ciclo de Krebs provocando un aumento en la velocidad de glucolisis con el fin de producir el sustrato, por lo cual ambas vías alimentan con electrones la cadena respiratoria. Cuando la concentración de ATP excede las concentraciones de ADP deprimen las velocidades del metabolismo energético (McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009).

2.3 EL INPUT, LA ENERGIA POTENCIAL

En los procesos metabólicos, la energía extraída de los alimentos ingeridos en la dieta es utilizada para el mantenimiento de la estructura y satisfacer las demandas de las funciones biológicas en reposo y la actividad física (López y Fernández, 2006; McArdle et al., 2015). Dependiendo del tipo de macromolécula que ingresa al organismo, esta puede entrar a una o varias vías metabólicas caracterizadas por la presencia de enzimas específicas que aceleran la velocidad de descomposición de las moléculas en subunidades más pequeñas liberando energía durante el proceso.

Para medir la energía potencial los laboratorios de alimentos y nutrición usan el calorímetro de bomba. Este instrumento opera por el principio de calorimetría directa, midiendo el calor liberado cuando el alimento se quema por completo en presencia de oxígeno. Una cubierta de agua alrededor de la bomba, absorbe la energía térmica liberada. El sistema es cerrado térmicamente del ambiente, por tanto, refleja el calor emitido al ser quemado el alimento (McArdle et al., 2015). La unidad de medida es la caloría, que es la cantidad de energía necesaria para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua. En promedio de la energía potencial al quemar 1 gramo de carbohidrato son 4,2 Kcal, 9, 4Kcal por cada gramo de lípidos ingeridos y 5.65 Kcal por gramo de proteínas (McArdle et al., 2015).

2.3.1 Carbohidratos

Son biomoléculas compuestas por carbono, hidrogeno y oxígeno que tienen funciones energéticas y estructurales. Los carbohidratos se clasifican en monosacáridos, oligosacáridos y polisacáridos:

1. *Monosacáridos*. La unidad básica de un carbohidrato es el monosacárido, los tres principales son la glucosa, galactosa, y fructosa. La glucosa es una molécula de 6 carbonos de formula química $C_6H_{12}O_6$, la fructosa es un isómero de la glucosa (McArdle et al., 2015).
2. *Oligosacáridos*. Son de 2 a 10 monosacáridos unidos químicamente. Los principales son los disacáridos. Los principales son la sacarosa, la lactosa y la maltosa. La galactosa se combina generalmente con glucosa para formar lactosa que es el azúcar

natural de la leche. La sacarosa es una combinación de glucosa y fructosa. La maltosa es la combinación de dos glucosas (McArdle et al., 2015).

3. *Polisacáridos*. Son la unión de 3 a cientos de moléculas de azúcar. Su origen es vegetal o animal. El almidón y la fibra son las formas más comunes de origen vegetal. En los animales es el glucógeno que sirve de almacenamiento de carbohidratos en el músculo y el hígado (McArdle et al., 2015).

La fibra es un polisacárido estructural diferente al almidón, incluye la celulosa, la molécula orgánica más abundante de la tierra, de origen vegetal. Se pueden clasificar en solubles como la pectina y la goma guar (presente en la avena, frijoles, zanahoria) e insolubles como la celulosa. No son digeribles por las enzimas digestivas, pueden fermentarse en el intestino grueso, lo que favorece el crecimiento de la flora intestinal normal, por esta razón se le denomina como sustancia prebiótica. La fibra retiene una gran cantidad de agua en el tracto intestinal dando volumen a la materia fecal. La fibra inhibe la absorción de grasa en el intestino y disminuye las lipoproteínas de baja densidad del perfil de colesterol. La fibra modifica el índice glicémico de los alimentos. En exceso puede inhibir la absorción intestinal de Calcio, Fósforo y Hierro (McArdle et al., 2015).

2.3.2 Lípidos

Los lípidos son moléculas que presentan una estructura similar a los carbohidratos (CHO) aunque difieren en sus enlaces y números de átomos. La relación entre el hidrógeno y el carbono de los CHO es de 2:1 mientras que en los lípidos esta relación puede llegar a ser de 18,3:1 como en el caso de la estearina ($C_{57}H_{10}O_6$) (McArdle et al., 2015).

Los lípidos incluyen aceites, grasas, ceras y compuestos relacionados. Son una fuente de energía casi ilimitada, aporta cerca del 30% y el 80% de la energía para el trabajo biológico (Nelson y Cox, 2009). En la nutrición humana son esenciales el ácido linolénico y linoleico.

Según McArdle et al. (2015) las funciones principales de los lípidos en cuerpo son:

1. Fuente y reserva de energía.
2. Protección de órganos vitales.
3. Aislamiento térmico.
4. Transportador de vitaminas y supresor del apetito.

En el cuerpo se encuentran principalmente en el tejido adiposo (entre 60000 y 100000 Kcal) el cual alberga alrededor del 90% de la grasa corporal, o en el musculo en forma de triacilglicerol intramuscular (cerca de 3000 Kcal). Órganos como el hígado, corazón y musculo esquelético en reposo utilizan sustancialmente a este combustible como fuente energética.

Los lípidos pueden clasificarse en simples, compuestos o derivados. Los lípidos simples son principalmente los triacilgliceroles; los lípidos compuestos son componentes de triacilglicerol combinados con otros compuestos como por ejemplo los fosfolípidos, los glucolípidos y las lipoproteínas. Los lípidos derivados están formados por lípidos simples y compuestos, el principal es el colesterol.

2.3.2.1 *Los ácidos grasos (AG)*

Pueden llegar a tener cadenas de carbonos rectas de 4 a más de 20 átomos, lo cual los clasifica como ácidos grasos de cadena corta (<6 carbonos), ácidos grasos de cadena media (6 a 12 carbonos), ácidos grasos de cadena larga (13 a 21 carbonos) y ácidos grasos de cadena muy larga (22 carbonos), estos últimos imposibles de metabolizar por la mitocondria por lo cual son degradados en otras estructuras (los peroxixomas) (McArdle et al., 2015). Las longitudes de cadena más frecuentes son de 16 y 18 carbonos.

Los lípidos simples pueden subdividirse en ácidos grasos saturados o insaturados dependiendo de la presencia o ausencia de dobles enlaces entre los átomos de carbono. Un ácido graso trans se forma cuando uno de los átomos de hidrogeno que se encuentran a lo largo de la cadena de carbono re estructurado se mueve de su posición natural (posición *cis*) hacia el lado opuesto del enlace doble que separa dos átomos de carbono (posición *trans*) (McArdle et al., 2015).

2.3.2.2 *Los triglicéridos*

Están compuestas por un glicerol (molécula de 3 carbonos) unido a tres moléculas de ácidos grasos (no ramificadas) con un extremo carboxilo (-COOH) el cual le confiere a la molécula su característica acida. Los triacilgliceroles o triglicéridos son lípidos simples y representan alrededor del 98% del lípido dietético (McArdle et al., 2015). Es importante destacar el papel

del glicerol en el metabolismo energético, el cual puede convertirse en 3- fosfogliceraldehído lo que le permite entrar a la glucolisis, degradarse hasta piruvato, producir acetil-CoA y participar en el ciclo de Krebs. “La degradación de una sola molécula de glicerol sintetiza 19 moléculas de ATP” (McArdle et al., 2015, p. 153).

2.3.2.3 *Las lipoproteínas*

En el hígado se forman las lipoproteínas, moléculas encargadas del transporte de lípidos en la sangre hacia el tejido adiposo y al musculo esquelético. Son esferas de proteínas unidas a triglicéridos o fosfolípidos (McArdle et al., 2015). Son lipoproteínas los quilomicrones, las Lipoproteínas de Alta densidad (HDL), baja densidad (LDL) y de muy baja densidad (VLDL).

Los ácidos grasos de cadena larga requieren de las sales biliares durante la digestión para ser emulsionados y ser accesibles a la acción hidrolítica de las lipasas y estearasas intestinales. “Los quilomicrones se forman cuando las gotas de lípidos emulsionadas (incluidos triacilglicerol de cadena larga, fosfolípidos y AGL) salen del intestino y entran a los vasos linfáticos” (McArdle et al., 2015, p. 23). En condiciones normales los quilomicrones son metabolizados en el hígado y son luego almacenados en el tejido adiposo. Son lipoproteínas importantes porque son los vehículos transportadores de vitaminas liposolubles como la A, D, E y K. (McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009).

Los quilomicrones y la VLDL no representan un aporte importante al metabolismo energético. Se degradan principalmente durante el ejercicio intenso y prolongado, mientras que durante el ejercicio físico ligero o moderado no sufren un cambio significativo (López & Fernández, 2006).

Las HDL contienen mayor proporción de proteínas, hasta un 50%, “actúa como recolector en el transporte inverso del colesterol, eliminándolo de la pared arterial y liberándolo en el hígado para su incorporación en la bilis y excreción subsecuente a través del tracto intestinal” (McArdle et al., 2015, p. 25).

Las lipoproteínas de muy baja densidad VLDL, tiene hasta un 95 % de grasa y de estos el 60% son Triglicéridos. La VLDL por acción de la lipoproteína lipasa se convierte en LDL, con menor contenido de grasa. Las lipoproteínas de baja densidad suelen depositarse en las arterias ocasionando problemas de salud como la arterioesclerosis.

2.3.2.4 *El colesterol*

El colesterol, es un esteroide, no contiene ácidos grasos, pero comparte algunas características físicas y químicas con los lípidos. Solo existe en animales. Es sintetizado en el hígado, aunque otros tejidos como paredes de arterias e intestinos también forman este compuesto. Funciona como formador de membranas plasmáticas y como precursor de la Vitamina D, hormonas suprarrenales y las hormonas sexuales estrógeno, andrógeno y progesterona (McArdle et al., 2015).

2.3.3 **Proteínas**

Las proteínas son conjunto de aminoácidos enlazados mediante enlaces peptídicos. Estos aminoácidos se componen de un grupo amino con carga positiva en un extremo de la molécula y un extremo ácido con carga negativa en el otro extremo. El grupo amino tiene dos átomos de hidrógeno unidos a un nitrógeno (NH_2), en tanto que el grupo de ácido orgánico contiene un átomo de carbono, dos átomos de oxígeno y un átomo de hidrógeno (COOH). El resto del aminoácido, conocido como grupo R o cadena lateral determina las características particulares del aminoácido (McArdle et al., 2015).

Son 20 aminoácidos los que el cuerpo requiere de los cuales 8 aminoácidos son considerados “esenciales” debido a que el cuerpo no los puede sintetizar. Los Aminoácidos esenciales son: isoleucina, leucina, valina (Estos tres son llamados aminoácidos de cadena ramificada), metionina, fenilalanina, treonina y triptófano (McArdle et al., 2015).

Los aminoácidos son utilizados principalmente en funciones estructurales, aunque en sujetos en reposo bien nutridos el catabolismo de las proteínas puede representar entre un 2% a un 5% del requerimiento energético total del cuerpo (McArdle et al., 2015), el cual puede aumentar en condiciones de inanición, actividad física prolongada, ingesta inadecuada de carbohidratos y proteínas, diabetes mellitus, o exceso en el consumo de este macronutriente (Garrido, 2005; McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009).

2.4 **PROCESOS ENERGÉTICOS EN EL CITOSOL CELULAR**

En el citoplasma de la célula tienen lugar dos procesos energéticos fundamentales: La vía Glucolítica o glucólisis y la activación de los ácidos grasos para su posterior ingreso y oxidación en la mitocondria. También ocurren los procesos de transaminación de las

proteínas durante el cual un aminoácido transfiere su grupo amino a otro compuesto, quedando su esqueleto carbonado libre para su utilización en el metabolismo energético.

2.4.1 La vía glucolítica

La glucolisis o vía de Embden-Meyerhoff es la vía metabólica que usa la glucosa proveniente de los carbohidratos de la dieta como sustrato para la síntesis de ATP en la célula. Tiene lugar en el citosol celular, una vez que las moléculas de glucosa logran atravesar la membrana plasmática hacia el interior de la célula gracias a la acción de la insulina.

Dado que la membrana plasmática no es permeable a moléculas polares como la glucosa, se requieren de unas proteínas transportadoras acopladas a la membrana (Sandoval, Vargas, Flores y Gurrola, 2016). En la membrana celular existen receptores a los cuales se adhiere la insulina encargados de transportar la señal desde el espacio extracelular, hacia el interior de la célula.

Estas uniones de la hormona con los receptores de insulina en la membrana plasmática generan una cascada de eventos intracelulares, que desencadenan la translocación de unos transportadores de glucosa desde el citoplasma hacia la membrana citosólica, permitiendo el ingreso de glucosa al interior de la célula (Sandoval et al., 2016).

Las principales proteínas transportadoras de glucosa son conocidas como GLUT, de los cuales se describió 14 isoformas presentes en diferentes tejidos (Gómez y Urdampilleta, 2012). Los GLUT-4, es la única isoforma regulada por la insulina y la contracción muscular, “Tanto la contracción muscular como la insulina aumentan el número de transportadores en la membrana y reducen el número presente en el citoplasma, de modo que aumenta la captación” (Gómez y Urdampilleta, 2012, p. 20). Se presentan principalmente en tejido cardíaco, músculo esquelético y tejido adiposo (tejidos sensibles a insulina). Se encuentran almacenados en forma de vesículas en el citoplasma las cuales son sensibles a la insulina, el ejercicio físico y la hipoxia (Gómez y Urdampilleta, 2012).

Una vez que la molécula de glucosa se encuentra al interior de la célula, inicia en la vía glucolítica. En esta vía se extrae la energía contenida en la molécula de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) en una serie de reacciones que terminan por dividir el esqueleto de carbono del sustrato en dos moléculas de piruvato, cada uno con tres carbonos los cuales podrán ser reducidos en lactato (Fermentación) o ingresar al sistema oxidativo en forma de acetil-CoA.

“La degradación completa de un mol de glucosa hasta dióxido de carbono y agua genera un máximo de 686 Kcal de energía química libre disponible para el trabajo” (McArdle et al., 2015, p. 141). El músculo e hígado almacenan la glucosa en polímeros de glucógeno en forma de glucosa 1- fosfato, los cuales ante demandas energéticas mayores a las del reposo pueden descomponerse en glucosa 6- fosfato y entrar en la glucólisis (López y Fernández, 2006).

Son 10 reacciones en total que hacen parte de la glucólisis, se dividen en dos fases:

- Una fase de preparación de la glucólisis donde la molécula de glucosa se activa al fosforilarse con dos ATP. Un ATP en la reacción 1, donde se convierte en glucosa 6- fosfato, y otro en la reacción 3 donde se produce fructuosa 6,1- difosfato reacciones catalizadas por dos importantes enzimas como son la hexocinasa y la fosfofructocinasa respectivamente. Posteriormente, la fructuosa 6,1 difosfato se disocia en dos moléculas de tres carbonos las cuales sufrirán las mismas reacciones durante la fase 2.
- En la fase de beneficios, las dos moléculas de 3- fosfogliceraldehído se someten a una serie de reacciones redox o de óxido-reducción, donde intervienen moléculas transportadoras de electrones (NAD^+) que aceptan los electrones retirados de las moléculas de carbono para cederlos en la cadena respiratoria membrana interna mitocondrial y oxidarlos en la fosforilación oxidativa o acoplarlos al piruvato. Durante esta segunda fase, se obtienen dos moléculas de NADH (NAD^+ reducido), 4 moléculas de ATP y dos moléculas de agua, convirtiendo las dos moléculas de 3- fosfogliceraldehído en dos de piruvato (Nelson y Cox, 2009).

El balance energético general de la glucólisis es de 2 Mol de ATP por molécula de glucosa, ya que durante la fase inicial intervienen dos moléculas de ATP para activar la glucosa. “Esto representa una conservación endergónica de 14,6 Kcal/mol de glucosa todo sin que participe la molécula de oxígeno” (McArdle et al., 2015, p. 114).

Los electrones atrapados en los NADH que se dirijan a la cadena transportadora de electrones para ser oxidados vía fosforilación oxidativa, producirán otro número de moléculas de ATP, elevando la producción a 32 moles en total de ATP por molécula de glucosa (McArdle et al., 2015).

Sin embargo, si los electrones de los NADH son recibidos por el piruvato, gracias a la acción de la enzima lactato deshidrogenasa (LDH), el producto final será lactato, que se acompaña de la liberación de un hidrogenión, molécula que tiene la capacidad de modificar la acidez del medio donde se encuentre (López y Fernández, 2006). Por lo anterior, cuando la producción de lactato aumenta, los hidrogeniones liberados a la sangre disminuyen su pH tornándola más ácida, lo cual se ha considerado como un factor que dificulta el mantenimiento de una demanda física por un tiempo prolongado.

2.4.2 Activación de los ácidos grasos

Las fuentes lipídicas utilizadas para la producción de energía provienen de los triglicéridos intramusculares, los triglicéridos transportados mediante las lipoproteínas (que se hidrolizan en el endotelio capilar del tejido) y de los AGL movilizados desde el tejido adiposo (McArdle et al., 2015). Los Ácidos Grasos son transportados en el torrente sanguíneo en unión con la Albumina sérica. El término ácido graso libre (AGL) designa a este complejo albúmina-ácido graso.

Una vez llega el AGL a la célula, este se disocia de la albumina y atraviesan la membrana plasmática por difusión y un sistema de transportadores proteicos presentes en la membrana plasmática.

Al interior de la célula, los ácidos grasos pueden re sintetizar triacilglicerolos o ser oxidados en la mitocondria. “Los ácidos grasos con longitudes de cadena de 12 o menos carbonos entran en la mitocondria sin la ayuda de transportadores de membrana” (Nelson y Cox, 2009, p. 650). Aquellos con más de 14 carbonos deberán pasar por reacciones enzimáticas de la lanzadera de la carnitina.

La primera de ellas tiene lugar en el citosol, y está catalizada por la acil-CoA sintetasa la cual une un ácido graso con la coenzima A hidrolizando dos enlaces de una molécula de ATP, obteniendo como resultado una molécula de acil graso-CoA, una molécula de AMP y un pirofosfato (2Pi). “Los ésteres de acil graso-CoA formados en el lado citosólico de la membrana mitocondrial externa pueden ser transportados al interior de la mitocondria y oxidados para producir ATP o pueden utilizarse para sintetizar lípidos de membrana” (Nelson y Cox, 2009, p. 651).

2.5 PROCESOS ENERGETICOS AL INTERIOR DE LA MITOCONDRIA

En la mitocondria, confluyen los esqueletos carbonados procedentes de varias vías degradativas. Como lo explica Garrido (2005): el piruvato, además de ser el producto final de la ruta glucolítica, se forma en el catabolismo de aminoácidos, en la oxidación de lactato, y es un precursor de la síntesis de aminoácidos, de la glucosa y del lactato. El acetil-CoA se forma en la degradación de ácidos grasos y de aminoácidos y es un precursor de la síntesis de ácidos grasos, cuerpos cetónicos, colesterol y otros lípidos de gran importancia biológica.

En la mitocondria ocurren procesos tales como el transporte de los acil grasos-CoA mediante la lanzadera de la carnitina, la conversión de piruvato en acetil-CoA y los procesos de desaminación y transaminación de los aminoácidos. La principal función de la mitocondria es la respiración celular. El oxígeno es el principal comburente de la célula, es decir, es el encargado de recibir la mayor parte de los electrones producidos durante las reacciones de óxido reducción que acontecen en las vías metabólicas. Los procesos de extracción de energía en forma de electrones de los macronutrientes pueden tomar una de las tres formas principales: glucolisis, beta-oxidación y ciclo de Krebs. En el primero, como se explicó anteriormente, la degradación de glucosa a piruvato produce dos moléculas de NADH cada una con dos electrones en su interior dispuestos a ser donados.

2.5.1 Conversión de piruvato a acetil-CoA

Una vez producido el piruvato en el citosol celular, este producto de la glicolisis podrá ser fermentado en el citoplasma o ingresar mediante difusión facilitada al interior de la mitocondria. Cuando se encuentra dentro de esta organela, el complejo multienzimático mitocondrial conocido como Piruvato deshidrogenasa (PDH), cataliza la descarboxilación oxidativa del piruvato, un proceso de oxidación irreversible del piruvato donde se transfieren dos hidrógenos al NAD^+ , formando NADH y se libera una molécula de CO_2 . Los carbonos restantes se unen con la coenzima A para formar el compuesto de dos carbonos Acetil-coenzima A o Acetil-CoA (Garrido, 2005; Nelson y Cox, 2009).



2.5.2 Lanzadera de la carnitina

Después de que los ácidos grasos son activados en el citoplasma celular (reacción 1 de la lanzadera de la carnitina), los acil grasos-CoA se unen a la carnitina gracias a la acción de la carnitina acil-transferasa I de la membrana externa mitocondrial, formando acil-carnitina (reacción 2). Este compuesto se convertirá en éster de carnitina dirigiéndose hacia espacio intermembrana gracias a unas proteínas llamadas porinas ubicadas en la membrana externa de la mitocondria.

Luego, el éster acil graso-carnitina ingresa a la matriz mitocondrial atravesando la membrana interna por difusión facilitada mediante el transportador de acil-carnitina/carnitina. En la tercera reacción de la lanzadera de la carnitina, los acil grasos son transferidos desde la carnitina a la coenzima A intramitocondrial, por acción de la carnitina aciltransferasa II, lo cual regenera el acil graso-CoA y lo libera junto con la carnitina libre, al interior de la matriz. La carnitina regresará al espacio intermembrana por el transportador acil-carnitina/carnitina (Nelson y Cox, 2009). El proceso de transporte mediado por la carnitina es un punto de regulación de la velocidad de oxidación de los ácidos grasos (Nelson y Cox, 2009).

2.5.3 La beta-oxidación

Cuando el acil graso-CoA se libera en la matriz mitocondrial pasa por un proceso conocido como Beta-oxidación. Este proceso consta de 4 reacciones: 2 deshidrogenaciones (reacción 1 y 3), una hidratación (reacción 2) y una tiólisis (reacción 4), donde las cadenas de carbono de los ácidos grasos se fracturan de dos en dos de manera cíclica formando acetil-CoA, proceso que libera dos pares de electrones y cuatro protones (H^+) que serán atrapados por el FADH y el NADH (López y Fernández, 2006; Nelson y Cox, 2009).

2.5.4 Desaminación y transaminación de los aminoácidos

La degradación de las proteínas puede tener fuentes tanto exógenas (proteína de la dieta) como endógenas (proteínas musculares). Durante estos procesos degradativos, las proteínas rompen sus enlaces liberando aminoácidos los cuales para poder ser metabolizados eficientemente deberán perder su componente nitrogenado con el fin de entrar a las vías energéticas.

Entonces, los procesos de desaminación suceden principalmente en el hígado donde, en primer lugar el aceptor principal de estos grupos amino es el α -cetoglutarato formando glutamato que posteriormente se dirige a la mitocondria y para eliminar el grupo amino en forma de un ion amonio NH_4^+ mediante desaminación oxidativa catalizada por la L-Glutamato deshidrogenasa.

También, en el músculo el exceso de los grupos amino se transfieren al piruvato (transaminación) formando alanina la cual elimina este grupo en el hígado. Estos procesos de transaminación se encargan de recoger los grupos aminos de muchos aminoácidos y transferirlos a las rutas biosintéticas o rutas de eliminación (Nelson y Cox, 2009).

Las enzimas encargadas de este último proceso pueden aumentar su concentración mediante el entrenamiento facilitando el uso de las proteínas como sustrato energético en el musculo (McArdle et al., 2015). Ahora bien, los esqueletos carbonados resultantes de estos procesos terminaran abasteciendo las rutas metabólicas oxidativas, es decir, entraran en el ciclo de Krebs.

Esto es posible dado que siete aminoácidos se degradan, total o parcialmente en acetil-CoA; cinco aminoácidos se convierten en α -cetoglutarato, cuatro en Succinil-CoA dos en fumarato y dos en oxaloacetato. Partes, o la totalidad, de seis aminoácidos se convierten en piruvato, que puede convertirse en acetil-CoA o en oxaloacetato (Nelson y Cox, 2009). De esta forma, algunos aminoácidos son considerados glucogénicos, es decir, producen piruvato, oxaloacetato o malato a partir de su desaminación como la alanina. Otros aminoácidos son cetogénicos puesto que a partir de su desaminación se produce acetil-CoA y acetoacetato (McArdle et al., 2015).

Cuando el cuerpo degrada los aminoácidos como fuente energética, el grupo amino que contiene nitrógeno y otros solutos producidos se eliminan a partir de la orina en forma de urea.

2.5.5 Ciclo de Krebs o Ciclo del Ácido Cítrico

Este mecanismo de extracción de energía, es una ruta central de la actividad metabólica de la célula puesto que aquí convergen los esqueletos carbonados resultantes del metabolismo de los tres macronutrientes (carbohidratos, lípidos y proteínas) en forma de acetil-CoA para ser oxidados conservando su energía temporalmente en los transportadores electrónicos $FADH_2$ y $NADH$ (Nelson y Cox, 2009). En el caso de las proteínas, estas eliminan el

nitrógeno de su estructura gracias a los procesos de desaminación y transaminación lo que facilita su participación en el metabolismo energético al transformarse en intermediarios del ciclo (McArdle et al., 2015).

En el ciclo de Krebs, las moléculas de acetil-CoA producidos por la beta-oxidación y la descarboxilación de las moléculas de piruvato pasan por una serie de reacciones encargadas de extraer electrones para su posterior oxidación en la fosforilación oxidativa (McArdle et al., 2015, p. 150). Son 8 las reacciones que suceden en este proceso, iniciando por una reacción de condensación entre el Acetil-CoA y el oxaloacetato para dar lugar al citrato, reacción catalizada por la citrato sintasa. El CoA liberado en este proceso se recicla para ser usado posteriormente en la descarboxilación del piruvato (Nelson y Cox, 2009). Durante los procesos degradativos que acontecen en el ciclo del ácido cítrico, se liberan dos carbonos en forma de CO_2 debido a la oxidación de isocitrato y el α -cetoglutarato, reacciones 3 y 4 respectivamente. También, se libera 1 NADH por cada reacción (2 en total). En la reacción 5 se forma un GTP (análogo del ATP) mediante la conversión del Succinil-CoA en succinato. En la reacción 6 cuando el succinato es oxidado en fumarato, los electrones liberados son atrapados por un FAD y, en la reacción 8 cuando se regenera la molécula de oxaloacetato a partir del malato, el aceptor final de electrones es el NAD^+ (Nelson y Cox, 2009). En total son 3 NADH, 1 FADH, 2 CO_2 y 1 GTP los que se producen cuando una molécula de acetil-CoA entra al ciclo (López y Fernández, 2006).

El carácter cíclico de este proceso se le atribuye dado que, después de una serie de reacciones, se regenera el compuesto de partida: el oxaloacetato, lo cual hace que el ciclo pueda seguir funcionando. Al no producirse una pérdida neta de oxaloacetato, esta molécula se recicla para reiniciar el ciclo con la entrada de otra molécula de acetil-CoA, como lo explica Garrido (2005):

cuando el ciclo está funcionando con fines energéticos una molécula de oxaloacetato sería suficiente para lograr la oxidación de un número infinito de moléculas de acetilo. En estas condiciones, se liberan 4 pares de hidrógenos (o sus electrones equivalentes), los cuales pasaran al oxígeno molecular para obtener energía en forma de ATP (p. 38).

Aunque durante el ciclo de Krebs no hay participación directa del oxígeno, este solo funciona en condiciones aeróbicas porque el NADH y el $FADH_2$ transfieren los electrones captados en este proceso al oxígeno molecular durante la fosforilación oxidativa posibilitando la formación de un gran número de moléculas de ATP. Sin una disponibilidad de oxígeno adecuada, los NADH Y FADH no podrían ceder sus electrones en la cadena respiratoria y regenerar NAD_+ y FAD, lo cual limitaría el funcionamiento del ciclo de Krebs (McArdle et al., 2015).

El ciclo de Krebs tiene un carácter anfibólico, sirve para procesos catabólicos y anabólicos. Intermediarios del ciclo funcionan como materia prima de muchas vías biosintéticas (Nelson y Cox, 2009).

2.5.6 Cadena transportadora de electrones y fosforilación oxidativa

En la cadena respiratoria, los electrones cedidos por los dinucleótidos de adenina y flavina, pasan por una serie de complejos proteicos ubicados en la membrana interna mitocondrial que permiten el paso de protones hacia el espacio intermembrana. Esto genera un gradiente electroquímico que produce energía suficiente para fosforilar el ATP en el complejo V (ATP-Sintasa).

La diferencia de concentración de protones al interior de la mitocondria, entre su matriz y el espacio intermembrana, produce una conservación temporal de la energía electroquímica generada por la transferencia electrónica. La energía almacenada en este tipo de gradiente se denomina *Fuerza protón-motriz* siendo esta la fuerza que utiliza la mitocondria para sintetizar ATP a partir de ADP y P_i . Esto sucede cuando los protones fluyen de manera pasiva de regreso a la matriz a través de un poro que se encuentra en la membrana mitocondrial asociado a la ATP sintasa, generando un flujo de energía encargado de llevar a cabo la fosforilación de ATP. Durante este proceso ocurre simultáneamente una reacción química y un proceso de transporte por lo cual hace parte del *Modelo o Acoplamiento Quimiosmótico* propuesto por Peter Mitchell, el cual es el principal medio endergónico de la célula para extraer y atrapar energía química en los fosfatos de alta energía (Nelson y Cox, 2009).

La oxidación de dos moléculas de hidrógeno por cada par de electrones que llegan al complejo IV produciendo una molécula de agua, y la formación de un ATP por cada cuatro

protones (H^+) que atraviesan el complejo V constituye el proceso conocido como fosforilación oxidativa (McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009).

La fosforilación oxidativa representa un aporte importante de la síntesis de ATP que se produce en las células aeróbicas (más del 90%). La oxidación completa de una molécula de glucosa a CO_2 da lugar a la formación de 30 a 32 ATP, de estos, 28 moléculas de ATP se forman durante la fosforilación oxidativa (McArdle et al., 2015; Nelson y Cox, 2009).

2.6 VIA DE LOS FOSFAGENOS

Las principales vías catabólicas o de degradación que utiliza el organismo para extraer la energía de los compuestos carbonados son: la vía glucolítica y la vía oxidativa. Esta energía es retenida en nucleótidos como el ATP moneda energética principal en todo el trabajo biológico (López y Fernández, 2006). La utilización de las reservas musculares de este compuesto rico en energía y sus análogos se conoce como la Vía de los fosfagenos (López y Fernández, 2006). En esta vía, la participación de la fosfocreatina (PCr) como reserva energética que facilita la síntesis de ATP en menor tiempo en comparación a la producida por la utilización del glucógeno gracias a la capacidad de la creatin cinasa, enzima que dirige la fosforilación de ADP a ATP (McArdle et al., 2015). El sistema de los fosfagenos posibilita la realización de un trabajo máximo en un tiempo aproximado de 10 segundos, como un sprint de 100 metros. La utilización de las reservas de ATP y PCr intracelulares como fuente energética no requiere consumo de oxígeno (López y Fernández, 2006; McArdle et al., 2015). Por otro lado, cuando las reservas de ATP y PCr empiezan a disminuir considerablemente (alrededor de 10 a 40 segundos) otras vías catabólicas aumentan su velocidad para satisfacer las demandas energéticas.

2.7 MEDICIÓN DE LOS PROCESOS ENERGETICOS

2.7.1 Calorimetría directa e indirecta para la medición del gasto energético en humanos

El calor es el índice que se utiliza para medir el estado del metabolismo energético al ser este un producto final de los procesos de transferencia energética (McArdle et al., 2015). Debido a esto, se ha establecido como medida del gasto energético la Caloría que se define como la

cantidad de calor necesario para elevar un grado centígrado (1°C) la temperatura de un gramo de agua ($1000\text{ cal} = 1\text{ Kcal}$).

La medición del gasto calórico se hace principalmente mediante calorimetría, existiendo dos tipos: calorimetría directa y calorimetría indirecta.

1. *Calorimetría directa*. En este tipo de calorimetría se utilizan una cámara de medición donde se somete al individuo a la realización de actividad física o algún test ergo métrico. El primer calorímetro desarrollado por los profesores Atwater y Rosa constaba de una cámara en la que una persona podía comer, dormir y ejercitarse en una bicicleta ergo métrica. Este calorímetro era cerrado y aislado de forma térmica. Un volumen determinado de agua a una temperatura especificada circulaba por encima de la cámara absorbiendo el calor producido e irradiado por la persona. Los cambios en la temperatura del agua reflejaban el metabolismo energético del individuo (McArdle et al., 2015). Este tipo de calorimetría presenta aplicaciones prácticas limitadas debido a sus gastos elevados de tiempo y dinero por lo cual siguen siendo poco aplicables en casi todos los tipos de actividad física (McArdle et al., 2015).
2. *Calorimetría indirecta*. “Todas las reacciones que liberan energía en los seres humanos dependen del uso de oxígeno” (McArdle et al., 2015, p. 179). La calorimetría indirecta mide el gasto energético durante una actividad física a partir de la relación entre el oxígeno consumido y las calorías producidas obteniendo resultados similares a los obtenidos por calorimetría directa. Por cada litro (1L) de oxígeno que participa en los procesos energéticos del cuerpo se producen 5Kcal. Este valor sirve para calcular el gasto energético bajo condiciones de velocidad constante del metabolismo aeróbico (McArdle et al., 2015).

La espirometría de circuito cerrado y la espirometría de circuito abierto son los métodos usados en la calorimetría indirecta. En la primera, se utiliza un equipo complejo que consta de un circuito que aporta oxígeno para la inhalación y elimina el dióxido de carbono durante la exhalación. “La diferencia entre el volumen de oxígeno inicial y el final en el espirómetro calibrado indica el consumo de oxígeno durante el intervalo de medición” (McArdle et al., 2015, p. 180).

La espirometría de circuito abierto es el método más sencillo para la medición del consumo de oxígeno. En este método, la persona inhala aire ambiental con una composición constante de 20,93% de oxígeno, 0,03% de dióxido de carbono, 7904% de nitrógeno y poca cantidad de gases inertes (McArdle et al., 2015). La diferencia entre las concentraciones y los volúmenes de los gases, principalmente oxígeno y dióxido de carbono durante la espiración, en comparación con los de la inhalación reflejan el estado energético del organismo.

2.7.2 Medición del gasto energético mediante el consumo de oxígeno

El consumo de oxígeno (VO_2) es la cantidad de oxígeno que se consume en el organismo por unidad de tiempo. La cantidad de oxígeno que los tejidos pueden consumir depende de los sistemas de difusión, transporte y absorción del O_2 una vez que este ingresa en el organismo, por lo cual la fórmula de Fick señala el VO_2 como el producto del gasto cardiaco por la diferencia arteriovenosa de O_2 (López y Fernández, 2006):

$$VO_2 = Q \times D(a - v) O_2$$

El consumo de oxígeno se puede expresar en valores absolutos ($L \cdot \min^{-1}$ o $ml \cdot \min^{-1}$) o en valores relativos ($ml \cdot Kg^{-1} \cdot \min^{-1}$).

Una forma de medir el estado energético del organismo a partir del consumo de oxígeno es mediante los MET o equivalentes metabólicos. 1 MET, en valores relativos, es igual a $3,5 ml \cdot Kg^{-1} \cdot \min^{-1}$, lo cual se ha determinado como el gasto energético en estado de reposo. Para un varón de talla promedio los valores absolutos de 1 MET es igual a 250 ml x min mientras que para una mujer de talla promedio es de 200 ml x min (McArdle et al., 2015). Este mínimo de energía requerida por el cuerpo para sostener las funciones vitales en estado de reposo se conoce también como Tasa Metabólica de Reposo (TMR), aunque comúnmente es llamado Tasa Metabólica Basal (TMB) (McArdle et al., 2015). Existen modelos matemáticos para la medición de la TMR, como el de Harris-Benedict las cuales relacionan la masa corporal, la talla, la edad y el sexo (McArdle et al., 2015):

Mujeres:

$$TMR(Kcal \times 24Hrs) = 655 + (9,6 \times M) + (1,85 \times T) - (4,7 \times E)$$

Hombres:

$$TMR(Kcal \times 24Hrs) = 66,0 + (13,7 \times M) + (5,0 \times T) - (6,8 \times E)$$

Donde M es la masa corporal (Kg), T es la talla (Cm) y E es la edad de los sujetos.

Se puede clasificar el nivel de actividad física en relación a los MET gastados durante su desarrollo, es decir, un trabajo ligero representa el triple del consumo de oxígeno que durante el reposo (3 MET); el trabajo pesado se ubica entre 6 a 8 MET y el trabajo máximo incluye tareas superiores a 9 METS (McArdle et al., 2015, p. 199). Hombres y mujeres que realizan una actividad física a un mismo valor de MET pueden estar en niveles diferentes de actividad metabólica.

2.7.2.1 Consumo máximo de oxígeno (VO_{2max})

El consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), es la cantidad máxima de O_2 que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo lo cual determina la capacidad funcional de un sujeto ante esfuerzos superiores a 4 o 5 minutos (McArdle et al., 2015, p. 166). Este consumo máximo de oxígeno está determinado por factores genéticos, sexo, edad, composición corporal y estado de entrenamiento (López y Fernández, 2006).

El VO_{2max} es una medida útil para determinar el estado de tolerancia al ejercicio de una persona indicando la salud cardiovascular del individuo y su capacidad aeróbica. También es tomado como un índice que evalúa la intensidad del esfuerzo, esto es, en cada porcentaje del VO_{2max} que se trabaje, el organismo responde de manera diferente siendo los porcentajes más altos de esta medida los que más estrés producen a nivel de los sistemas energéticos y en la homeostasis del cuerpo de tal forma que la intensidad del esfuerzo y el VO_2 mantienen una relación lineal durante los esfuerzos de carácter sub-máximo. Cuando se realizan ejercicios de carácter incremental llegando al VO_{2max} y sobrepasando esta intensidad, el VO_2 entra en una meseta (López y Fernández, 2006). Durante los ejercicios de velocidad constante el VO_2 aumenta en primer lugar de manera rápida durante los primeros minutos de trabajo, seguido de una fase más lenta para llegar a una meseta la cual representa el estado estable el cual es un estado constante entre la energía requerida por los músculos que trabajan y la producción del ATP del metabolismo oxidativo. La cantidad de oxígeno que no se consume durante los minutos previos al estado estable donde la energía es aportada principalmente por la vía de los fosfágenos y la vía glucolítica se conoce como Déficit de

oxígeno, esto es, la diferencia entre el VO_2 total durante la actividad y el total que debió haberse consumido si se hubiera logrado la meseta desde el principio de la actividad (McArdle et al., 2015). La velocidad con la que se logra alcanzar el estado estable depende de la intensidad del esfuerzo (López y Fernández, 2006).

2.7.2.2 *Test Ergométricos*

La ergometría, también llamada Prueba de esfuerzo utiliza ejercicios que activan grandes grupos musculares con una intensidad y duración suficientes para conseguir una transferencia máxima de anergia por vía aeróbica (López y Fernández, 2006). Cuando estas pruebas usan equipos de espirometría se conoce como Ergo espirometría. Estas pruebas se realizan en el laboratorio o en el terreno donde el deportista lleva a cabo su actividad deportiva.

Los ergómetros utilizados pueden ser un escalón (Step), ergómetro de manivela, remoergómetro, piscina ergométrica, tapiz rodante o cicloergómetro (López y Fernández, 2006). Los más usados son el tapiz rodante y el cicloergómetro. Cabe destacar que se obtienen valores inferiores entre 6% a 20% en el VO_{2max} mediante test cicloergométricos que mediante las pruebas en tapiz rodante, esto a raíz de que en el primero se moviliza menos masa muscular y la mayor fatiga localizada (López y Fernández, 2006). En los cicloergómetros, la carga de trabajo se puede expresar en Watts o $Kg \cdot min^{-1}$.

Existen dos protocolos utilizados en el desarrollo de los test ergométricos: los protocolos de carga constante y los protocolos de carga incremental. Estos últimos se subdividen en discontinuo donde se aplican cargas de 1 a 3 minutos de duración mediadas por periodos sin carga; los protocolos continuos pueden ser a su vez en rampa o escalonados con incrementos importantes en los niveles de trabajo cada minuto o tres minutos o aumentos menos bruscos más continuos (López y Fernández, 2006).

2.7.3 **Medición del gasto energético en unidades mecánicas**

La energía puede ser definida como la capacidad de un cuerpo para producir trabajo o transferir calor. Según McArdle et al. (2015) “el termino energia refleja un estado dinamico relacionado con el cambio; por lo tanto, la energia emerge solo cuando hay un cambio. En este contexto, la energia se relaciona con la realizacion de una trabajo: conforme el trabajo aumenta tambien lo hace la transferencia de energia y en consecuencia cambia.” (p. 118). El

trabajo es un fenómeno mecánico que se define como el producto de una fuerza aplicada a lo largo de una distancia.

$$W = F \cdot d$$

En la célula los procesos de transferencia de energía transforman la energía química en energía mecánica, por lo cual el trabajo biológico puede medirse en unidades mecánicas de trabajo como lo son:

- El Julio (J) = $N \cdot M = Kg \cdot \left(\frac{M}{s^2}\right) = \frac{Kg \cdot M^2}{s^2}$
- El Kilo Julio (kJ) = 1000J
- El Kilogrametro (KgM) = 9,8 J

La potencia producida durante un esfuerzo físico también resulta útil durante la medición del gasto energético. La potencia se define como la rapidez con la que se realiza un trabajo se mide en Watts y se utiliza principalmente para medir la capacidad máxima de esfuerzos cortos como en pruebas de potencia de sprint en escalera o pruebas de potencia en sprint en carrera o bicicleta donde se evalúan los sistemas energéticos de los fosfógenos principalmente (McArdle et al., 2015). La fórmula de potencia es la relación entre el trabajo efectuado sobre el tiempo utilizado para llevarse a cabo:

$$P = \frac{(FD)}{t} = \frac{W}{t}$$

Existen equivalencias entre las medidas de trabajo mecánico (fuerza y potencia) y la medida de calor lo que permite medir el gasto calórico de un organismo durante una actividad a partir del trabajo mecánico producido.

- 1 J = 0,238902957 cal
- 1 W = 0,01433 Kcal
- 1 cal = 4,187 J

El test de Wingate valora la capacidad anaeróbica de un sujeto a partir de las medidas de potencia producidas durante una prueba en cicloergómetro. Mediante esta prueba se pueden determinar variables como: la producción de potencia pico, la producción de potencia pico relativa, la fatiga anaeróbica y el trabajo anaeróbico (McArdle et al., 2015).

2.7.4 Medición del metabolismo energético mediante Umbrales

El estado del metabolismo celular durante una demanda física puede medirse mediante diferentes procedimientos. La determinación de los umbrales metabólicos es una ayuda útil para conocer el funcionamiento sistémico y la capacidad funcional de un sujeto ya sea en la práctica médica o en el ámbito deportivo. Los dos umbrales principales para la medición del estado metabólico celular son el Umbral Anaeróbico (UA) y el Umbral Ventilatorio (UV). Aunque ambos umbrales han sido definidos como análogos presentan diferencias importantes, principalmente por el método usado para su determinación. El UA se halla principalmente por la medición de la concentración de lactato en sangre mientras que el UV se determina mediante el análisis del intercambio gaseoso usando equipos espiro métricos, ambos medidos durante una prueba ergométrica.

López y Fernández (2006) exponen otros metodos para la valoracion de los umbrales metabolicos como son:

1. Determinación por análisis de saliva, donde se analizan las variaciones en los electrolitos Na^+ y Cl^- durante un esfuerzo físico. La intensidad del esfuerzo donde se produce el aumento significativo y de forma continua en las concentraciones de estos electrolitos se corresponde con la intensidad del umbral láctico y el umbral de catecolaminas.
2. Determinación por catecolaminas plasmáticas: Existe un “fenómeno umbral” en la producción de catecolaminas a intensidades similares a las del UA, además de correlaciones significativas entre las concentraciones de lactato, adrenalina y noradrenalina durante el ejercicio.
3. Determinación por percepción subjetiva del esfuerzo (RPE). Se han establecido los valores umbrales en un rango entre 10 y 13 en la escala RPE.
4. El doble producto. Relaciona la frecuencia cardiaca (FC) con la presión arterial sistólica (FC x Pas). El Umbral láctico se relaciona con el punto de ruptura del doble producto durante un test incremental.
5. La electromiografía de superficie integrada (iEMG). “Se ha demostrado un aumento no lineal del iEMG en la fase de transición aeróbica-anaeróbica durante un test incremental, sugiriendo que el iEMG podría ser utilizado como un marcador no

invasivo de la intensidad de ejercicio correspondiente al umbral láctico” (López y Fernández, 2006, p. 431).

6. Determinación por frecuencia cardiaca (FC). El punto donde la FC pierde su linealidad en relación con la velocidad de carrera corresponde al umbral láctico.

Según López y Fernández (2006), la determinación de estos umbrales tiene especial importancia por los siguientes aspectos:

- Valoración de la capacidad de resistencia cardiovascular.
- Evaluación de los efectos de entrenamiento puesto que los valores del LT y el VT son susceptibles a mejorar a través del entrenamiento.
- Prescripción de la intensidad del ejercicio.
- Predicción del rendimiento.

2.7.4.1 Umbral anaeróbico: determinación por medición de lactato en sangre

Cuando las demandas de energía celulares para sostener un trabajo (principalmente mecánico como el ejercicio físico), superan la capacidad energética del metabolismo oxidativo, la glucosa cobra importancia en el aporte energético a la célula mediante su degradación en la glucólisis (López y Fernández, 2006). Esta participación aumentada de la glucosa en el metabolismo energético da como resultado la producción de lactato en el músculo activo por vía fermentativa, principalmente en las fibras musculares tipo II, de donde saldrá para ser transportado en la sangre hacia los tejidos que utilizan este metabolito como sustrato energético o convertirse en depósito de energía en forma de glucógeno (López y Fernández, 2006).

El termino Umbral Anaeróbico tiene su origen en los estudios de Wasserman y Mc Ilroy en 1964, quienes lo describieron como “la carga de trabajo o consumo de oxígeno (VO_2) a partir de la cual se empieza a instaurar un estado de acidosis metabólica y ocurren cambios asociados en el intercambio gaseoso” (citados en López y Fernández, 2006). El término anaerobio para descripción de este fenómeno ha causado gran controversia en cuanto al verdadero significado de esta denominación. De esta forma algunos autores han intentado atribuir este término basados en el desfase entre la demanda de oxígeno necesitado por el

musculo durante la actividad física de determinada intensidad y su disponibilidad. También con este término se ha querido describir la vía metabólica que no requiere oxígeno para su normal funcionamiento (López y Legido, 1991).

La medición del lactato comúnmente se realiza mediante sangre capilar obtenida del lóbulo de la oreja o de la yema de los dedos mediante analizadores de lactato en sangre. La determinación del UA se realiza mediante la aplicación de este método durante un test ergo métrico de carácter incremental, tomando muestras de sangre cada determinado tiempo para medir las variaciones en las concentraciones de lactato.

En reposo, los niveles de lactato en sangre son constantes gracias a la tasa de renovación metabólica manteniéndose concentraciones sanguíneas entre 0.7-1mM/L (López y Legido, 1991). Los estudios acerca del comportamiento del lactato en sangre mostraron como la actividad física procedía sin acumulación de lactato durante ciertas intensidades, y que, a partir de cierto nivel de esfuerzo, este empezaba a aumentar.

La intensidad (VO_2) de ejercicio en la cual la concentración de lactato comienza a elevarse por encima de los valores en reposo se ha definido como Umbral del metabolismo anaerobio o Umbral láctico. De esta forma se definió este punto en 2mM/L, siendo esta medida donde el lactato empieza a incrementar el lactato de manera continua (López y Fernández, 2006). En individuos sedentarios, este umbral acontece entre el 50% al 60% del VO_{2max} mientras que en atletas entrenados en resistencia aparece entre el 80% al 90% del VO_{2max} (López y Fernández, 2006). Posteriormente, diferentes estudios corroboraron que atletas entrenados podían mantener concentraciones de lactato por encima de 2mM sin un aumento excesivo de este metabolito lo cual conlleva a estudiar un máximo estado de equilibrio entre los procesos de aclaramiento y producción de lactato. El máximo estado estable de lactato (MLSS) puede ser definido como la más alta concentración de lactato sanguíneo compatible con un equilibrio entre la tasa de producción, respecto a su aclaramiento, durante un ejercicio de carga constante de aproximadamente 30 minutos de duración (López y Fernández, 2006). El MLSS está determinado en 4 mM/L, aunque existen variaciones individuales para este índice metabólico (López y Fernández, 2006).

Las causas de la aparición del umbral de lactato según McArdle et al. (2015), podría deberse a cuatro causas:

1. Desequilibrio entre velocidad de glucolisis y respiración mitocondrial.

2. Menor potencial redox (NADH incrementado en relación con NAD^+).
3. Menor contenido sanguíneo de oxígeno.
4. Menor flujo sanguíneo al musculo esquelético.

Muchos autores han estudiado el mismo fenómeno proponiendo nomenclaturas diferentes para este estado metabólico:

2 mM/L	2-4 mM/L	4 mM/L	Autor
Punto de óptima eficiencia respiratoria			Hollman (1959)
Umbral del metabolismo anaerobio			Wasserman (1964)
Umbral aerobio	Zona de transición aerobia-anaerobia	Umbral Anaerobio	Skinner-McLellan (1980)
Inicio del acumulo de lactato en plasma (OPLA)			Farrell (1979)
Umbral Ventilatorio 1		Umbral Ventilatorio 2	Orr (1982)
Transición aerobia-anaerobia			Pessenhofer (1981)
		Umbral aerobio-anaerobio	Mader (1976)
		Umbral anaerobico individual (IAT)	Keul (1979)
		Inicio del acumulo de lactato en sangre (OBLA)	Sjodin y Jacobs (1981)
		Umbral anaerobio individual	Stegman (1981)
Umbral Aerobio		Umbral anaerobio individual	Kinderman (1979)
Nivel metabólico crítico			Owles (1930)
Máximo estado estable			Londeree (1975)
Umbral lactico			Davis (1976)

Elaborado por López y Legido (1991).

2.7.4.2 Umbral ventilatorio: determinación por intercambio gaseoso

El comportamiento de la ventilación durante el ejercicio físico puede ser descrito en tres fases. En la primera fase existe un aumento abrupto de la ventilación regido principalmente por el sistema nervioso central dado que se presenta sin un cambio en las concentraciones químicas de la sangre. Además, la retroalimentación desde las extremidades activas potencia esta respuesta. Esta fase inicial puede durar entre 30 a 50 segundos, pudiendo empezar antes del inicio de la actividad (López y Fernández, 2006). En la fase dos, la alteración en la composición química de la sangre influencia el aumento de la ventilación, aunque de forma más lenta en comparación con la fase anterior. Durante la fase tres, se alcanza una estabilidad en la respuesta ventilatoria, principalmente en ejercicios de intensidad moderada.

En la actividad ligera y moderada, la ventilación pulmonar aumenta de manera lineal al consumo de oxígeno y la producción de CO_2 (VCO_2) manteniendo la $PaCO_2$ cerca de los valores de reposo. Es estas intensidades, el aumento en los valores del volumen corriente (VC) resulta importante. Durante los ejercicios intensos, esta fase estable no se produce perdiendo la relación lineal entre la ventilación y el consumo de oxígeno a intensidades entre 50% al 60% del VO_{2max} determinando así el Umbral ventilatorio (López y Fernández, 2006). El aumento desproporcionado de la ventilación puede ser ocasionado también por el aumento de catecolaminas y de la temperatura corporal (López y Fernández, 2006). Por lo anterior, la taquipnea producida por la estimulación del centro respiratorio se considera un predictor de la acidosis metabólica durante el ejercicio (López y Fernández, 2006).

“El umbral de ventilación (T_{VENT}) es el punto en el que la ventilación pulmonar aumenta de manera desproporcionada en relación con los incrementos del consumo de oxígeno (hay un aumento notable y repentino del cociente V_E/VO_2) durante el ejercicio gradual” (McArdle et al., 2015, p. 290).

La ergo espirometría es un método no invasivo que permite medir el comportamiento de los gases y el VO_2 durante un esfuerzo físico. Este es un método alternativo para la estimación de los umbrales metabólicos como el umbral láctico (2mM) y el umbral anaeróbico (4mM), los cuales son hallados estudiando las concentraciones de lactato en sangre. Estos umbrales se aproximan a los estados metabólicos encontrados en pruebas de ergo espirometría y se han denominado Umbral Ventilatorio 1 y Umbral Ventilatorio 2.

La ergoespirometría de circuito abierto es el método más usado dado a su practicidad para evaluar el VO_2 . Mediante este método se miden las variaciones de los gases,

principalmente en las concentraciones de O_2 y CO_2 , entre el aire inspirado y el aire espirado puesto que esto refleja las condiciones del metabolismo energético (McArdle et al., 2015).

La medición del intercambio de gases para expresar la condición del metabolismo durante un esfuerzo físico radica en la capacidad del organismo para responder ante las variaciones en los estados químicos del cuerpo. Cuando el ejercicio físico alcanza una determinada intensidad, los procesos glucolíticos aumentan su aporte energético para sostener las demandas musculares de energía, esto conlleva a un aumento de la producción de lactato e hidrogeniones que al salir de la célula muscular son amortiguados por el bicarbonato plasmático, adicionando CO_2 a la sangre que ya contiene el producido por el metabolismo oxidativo aumentando la producción de CO_2 (VCO_2) y consigo la ventilación por minuto de forma desproporcionada en relación al VO_2 .

Existen diferentes métodos para establecer el umbral ventilatorio mediante el comportamiento de los gases durante el ejercicio. “Estos cambios en el intercambio gaseoso, que se reflejan en las variables V_E , VCO_2 , V_E/VCO_2 , V_E/VO_2 han sido utilizados como medios no invasivos de determinación de la transición aerobia-anaerobia” (López y Fernández, 2006, pág. 426).

Una de las metodologías para determinar el UV por intercambio gaseoso es mediante el análisis del Cociente Respiratorio (RQ) o Tasa de intercambio respiratoria. El RQ es la relación entre la cantidad de CO_2 producido en relación al consumo de oxígeno (VCO_2/VO_2) el cual sirve como un predictor del estado metabólico del organismo. Un RQ para una dieta mixta (carbohidratos, lípidos y proteínas) se aproxima a 0,82. Una disminución en el valor del RQ representa una predominancia de las grasas como sustrato energético para el metabolismo mientras que una elevación del RQ cerca de 1 o más, refiere una utilización importante de los carbohidratos como sustrato energético.

Durante las pruebas incrementales de ejercicio físico controladas mediante el RQ, primero acontece una disminución de este valor seguido de un aumento progresivo en una determinada carga de trabajo. El aumento abrupto del RQ señala la intensidad (VO_2) en la cual la participación del sistema glucolítico se acentúa liberando hidrogeniones y lactato lo cual conlleva a una disminución de las concentraciones de bicarbonato (López y Fernández, 2006).

El modelo trifásico de Skinner y McLellan en 1980 propone que el estado metabólico del organismo del reposo a la actividad física intensa transcurre en tres fases (citados en López y Fernández, 2006):

- Fase I: Amortiguación celular del lactato, con aumento de la producción del CO_2 (VCO_2) en relación al consumo de oxígeno (VO_2).
- Fase II: Incremento de la ventilación pulmonar (V_E) proporcional al aumento del VCO_2 , mientras que la $PaCO_2$ se mantiene relativamente constante (Isocapnic Buffering).
- Fase III: Compensación respiratoria de la acidosis metabólica, con descenso de la $PaCO_2$.

Durante la fase II, se produce el primer Umbral ventilatorio (VT1) o Umbral láctico llegando el organismo a concentraciones de 2 mM/L de lactato en sangre. Debido a esto, se produce un aumento mayor de la ventilación por minuto en relación al VO_2 perdiendo la linealidad entre ambos indicadores. Esto incrementa los valores del equivalente ventilatorio para el oxígeno (V_E/VO_2) mientras que los valores para el V_E/VCO_2 se conserva. En la fase II, los procesos de aclaramiento de lactato igualan a los de producción generando una estabilidad en los valores de pH sanguíneo. Ya en la fase III, los procesos de producción superan los procesos de aclaramiento por lo cual la acidez en sangre aumenta intensificándose aún más la ventilación pulmonar (Punto de compensación respiratoria), rompiendo la linealidad con el VCO_2 (incrementan los valores para el V_E/VCO_2) y disminuyendo los valores para la $PaCO_2$. Durante esta última fase se alcanzan los valores de lactato en sangre de 4mM/L lo cual representa el OBLA o segundo umbral ventilatorio (VT2) (López y Fernández, 2006). Entonces podremos definir el VT1 como la intensidad de ejercicio correspondiente con una inicial pérdida de la linealidad de la V_E , junto con el inicio del aumento continuado del V_E/VO_2 y de la fracción de oxígeno en el aire espirado (FE_{O_2}) o la presión parcial de O_2 en el aire final de la espiración ($P_{ET}O_2$). Por su parte, VT2 puede ser determinado por un segundo cambio no lineal de la V_E y del V_E/VO_2 , junto con un marcado aumento continuado del V_E/VCO_2 y un descenso continuo de la $FECO_2$ o de la $P_{ET}CO_2$, más allá del punto de determinación del VT1 (López y Fernández, 2006).

Beaver y colaboradores en 1986 (citados en López y Fernández, 2006) propusieron un modelo de determinación del VT1 mediante un método conocido como V-Slope. Este método relaciona las variaciones en el VO_2 y el VCO_2 alveolar respiración a respiración de manera que la detección del VT1 se realiza cuando estos dos parámetros pierden su linealidad.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 PSICOFISICA

La psicofísica es una rama de la psicología experimental que se encarga de cuantificar la relación entre un estímulo ambiental o físico y la sensación que produce, además de la percepción y los juicios que se emiten acerca del mismo; es la ciencia encargada de estudiar la relación entre lo físico y lo psíquico. De acuerdo a esta ciencia las dimensiones del estímulo y la percepción deben ser correspondientes, es decir, que si se producen variaciones en los atributos físicos de los estímulos se verán reflejados en las sensaciones que de los mismos tienen los sujetos (Munar, Sánchez y Roselló, 1999).

Esta metodología nace en Alemania a mediados del siglo XIX con Ernst Heinrich Weber (1795-1878) y Gustav Theodor Fechner (1801-1887), cuando la psicología aún era considerada por la comunidad científica una rama de la filosofía debido a que las sensaciones y percepciones resultaban ser subjetivas, por lo cual no se podían medir en forma consistente y estable (Aznar, 2009). Ya en 1960 Fechner definió la psicofísica como la ciencia exacta de las relaciones entre el cuerpo y la mente atribuyéndole a la psicología el carácter de verdadera disciplina científica debido a que posibilita el acceso a la interpretación de los procesos mentales internos a través del estudio de las sensaciones (Munar et al., 1999).

El Umbral Sensorial puede definirse como la cantidad de estimulación para producir una sensación o una toma de conciencia (Munar et al., 1999). Según Munar et al. (1999) la teoría del Umbral sensorial establece que “para activar un receptor sensorial se necesita de una determinada intensidad, ya que sin ella no se consigue provocar sensación en el sujeto” (p. 203). De esta forma, se define el Umbral Absoluto (UAbs) como la “cantidad mínima de energía capaz de provocar la estimulación de un órgano sensorial” (Munaret al., 1999, p. 203). Al ser el límite inferior por debajo del cual no somos conscientes del estímulo, también

se le conoce como Umbral de Conciencia (Aznar, 2009). El límite superior de estimulación aceptable por los sensores se le denomina Umbral de dolor o Umbral Absoluto Superior (Aznar, 2009). El Umbral Diferencial (Ud) o umbral relativo se define como “el mínimo incremento en la magnitud del estímulo necesario para que el sujeto perciba (advierta) un cambio” (Aznar, 2009, p. 7). De esta forma, el Ud se vincula con la discriminación entre dos estímulos y demuestra que no existe una relación lineal entre el continuo físico y el psicológico debido a que existen niveles de energía física por encima del UAbs que no son detectables (Munar et al., 1999).

La psicofísica se puede dividir en Psicofísica Clásica la cual tiene como referente a Fechner por lo cual también es conocida como Fechneriana, y la Psicofísica Moderna o de Stevens. En la primera se produce una correspondencia entre el continuo estimular (físico) y el continuo de respuesta (sensación) (Aznar, 2009). Sin embargo, esta psicofísica encuentra sus dificultades en los sesgos de respuesta lo cual abre paso a la nueva psicofísica donde no se mantiene ese paralelismo y se introducen otros factores determinantes de la sensación como la decisión del sujeto donde las variables internas (motivaciones, expectativas, expresiones, etc.) juegan un papel importante. La psicofísica clásica se interesó, principalmente, por el estudio de los umbrales sensoriales que vienen a ser “los límites” de nuestra sensación (Aznar, 2009).

3.2 METODOS DE LA PSICOFISICA CLASICA O INDIRECTOS

Para la determinación de los umbrales sensoriales, Fechner desarrollo tres métodos que se han denominado como los métodos psicofísicos clásicos o indirectos. Estos métodos toman la estadística como soporte para medir los procesos de sensación y percepción de los estímulos dado a que durante todos los experimentos no se mantienen constantes todos los factores que afectan la detección y la discriminación dificultando la determinación de los umbrales. Por las variaciones de resultados que pueden acontecer en los distintos ensayos, se determinaran los umbrales psicofísicos con el valor que es detectado en el 50 por ciento de las veces (Munar et al., 1999).

3.2.1 Método de los límites o mínimos

También conocido como el de las “diferencias mínimamente perceptibles” o “métodos de los cambios mínimos” o “métodos de la exploración seriada” (Aznar, 2009). Este método se basa en los límites de la sensación y consiste en presentar una serie de ensayos, la mitad serán de orden ascendente y la otra mitad de orden descendente, y se estimulara una determinada modalidad sensorial de manera que se determine un punto donde el estímulo dejara de percibirse (series descendentes) o cuando comenzara a ser percibido (series ascendentes) (Munar et al., 1999). Este punto será la magnitud del estímulo donde habrá un cambio en el sentido de respuesta del sujeto. También se podrá evaluar respecto a un estímulo estándar, si los valores presentados posteriormente son iguales, mayores o menores. “El método de los límites, a pesar de ser muy laborioso, ha sido uno de los más utilizados por su flexibilidad y adaptación a diferentes estímulos y situaciones” (Aznar, 2009, p. 21).

El UAbs es la media de los puntos de transición (PT) de todas las series (Munar et al., 1999). El siguiente es un ejemplo de la determinación de los umbrales mediante el método de los límites:

I	A	D	A	D	A	D	A	D
90		S		S		S		S
80		S		S		S		S
70		S		S		S		S
60		S		S		S		S
50	S	S		N	S	S	S	S
40	N	N	S		N	S	N	N
30	N		N		N	N	N	
20	N		N		N		N	
10	N		N		N		N	
PT	45	45	35	55	45	35	45	45

Elaborado por Munar et al. (1999).

Para hallar el PT o valores de cruces se suman los últimos dos valores más cercanos al cambio del sentido de la respuesta, en la tabla y para la primera serie ascendente seria cincuenta (50) más cuarenta (40) y se divide entre dos (2), en este caso, resultando un valor

de 45 en la escala hipotética. Se calcula el PT para todas las series y posteriormente el UAbs mediante la fórmula:

$$UA = \sum PT/n$$

Entonces, aplicando esta ecuación al ejemplo anterior:

$$UA = \frac{45 + 45 + 35 + 55 + 45 + 35 + 45 + 45}{8} = 43,75$$

En este caso el UAbs sería de 43,75. Esta sería la intensidad mínima de estimulación para que fuese captada por el observador o provocarle una sensación.

El cálculo del Umbral diferencial también llamado “Método de las *dmp*” consta de la presentación de un estímulo estándar (ES) comprendido entre el Uabs superior y el Uabs inferior, y un estímulo variable (EV) el cual se presenta en series ascendentes las cuales se interrumpen cuando el sujeto discrimina un estímulo como mayor que el ES y descendentes hasta que el estímulo se perciba como menor que el ES. El sujeto también podrá percibir el estímulo como igual que el estímulo estándar sin que se detenga la prueba. Posteriormente, se halla el Umbral alto (Ua) y el Umbral bajo (Ub) relacionando los puntos de transición del valor más alto del EV con el inmediatamente inferior (Ua) y el menor valor del EV con el inmediatamente superior (Ub). Por último, se determinan las medias aritméticas de cada umbral (Ua y Ub) y se halla el Ud mediante la siguiente formula (Aznar, 2009; Munar et al., 1999):

$$Ud = \frac{\left[\frac{\sum Ua}{n} \right] - \left[\frac{\sum Ub}{n} \right]}{2}$$

I	A	D	A	D	A	D	A	D
90		Ma		Ma		Ma		Ma
80		Ma		Ma		Ma		Ma
70		Ma		Ma		Ma		Ma
60	Ma	IG		Ma		IG		Ma

50	IG	IG	Ma	IG	Ma	Me	Ma	Ma
40	IG	Me	IG	IG	IG		IG	IG
30	Me		Me	IG	Me		IG	Me
20	Me		Me	Me	Me		Me	
10	Me		Me		Me		Me	
Ua	55	65	45	55	45	65	45	45
Ub	35	45	35	25	35	55	25	35

Elaborado por Munar et al. (1999).

Despejando la ecuación para la determinación del Ud con los datos recogidos en la tabla anterior:

$$\frac{\sum Ua}{n} = 52,5 \qquad \frac{\sum Ub}{n} = 36,25$$

Entonces,

$$Ud = \frac{52,5 - 36,25}{2} = 8,12$$

Esto significa que a partir de aumentos o disminuciones de 8,12 de intensidad por encima del UAbs, el sujeto en cuestión discriminaría el estímulo como de mayor o menor intensidad (Munar et al., 1999). Con variaciones de menor cuantía, los estímulos no serían detectados.

El intervalo de incertidumbre (II) es la zona donde el sujeto no diferencia claramente entre el EV y el ES y se calcula de la siguiente manera:

$$II = \left(\frac{\sum Ua}{n} \right) - \left(\frac{\sum Ub}{n} \right)$$

Aplicando intensidades que estén por encima del valor de la suma de este intervalo más el ES, el sujeto respondería el 50 por ciento de las veces que el EV es mayor; con intensidades

que estén por debajo del valor de la resta del ES menos el II, el sujeto responderá el 50 por ciento de las veces que el EV es menor. Además, existe un punto de igualdad subjetivo (PIS), punto en el que el sujeto percibe el ES y el EV como iguales. Se obtiene aplicando la siguiente formula:

$$PIS = \left(\left[\frac{\sum Ua}{n} \right] + \left[\frac{\sum Ub}{n} \right] \right)$$

El error constante es aquel cometido por el sujeto en la estimación de la comparación con respecto a los valores reales. Se determina mediante:

$$EC = PIS - ES$$

Si el valor del EC es negativo significa una subestimación del sujeto del valor del EV respecto al ES. Si es positivo, habría existido una sobreestimación. Y, si el resultado del EC es igual a 0, indicaría una estimación perfecta.

3.2.2 Método de los estímulos constantes

Este método, a diferencia del método de los límites, presenta los estímulos al azar en un orden aleatorio evitando con esto los errores de 'habitación' y 'anticipación'. También varía el procedimiento de cálculo del Uabs y del Ud.

El sujeto debe informar ante cada estímulo de comparación o variable, si este es mayor, igual o menor que el estímulo estándar, que normalmente tiene el valor medio de la serie y se considera umbral a aquella intensidad que es detectada en la mitad de sus presentaciones.

No siempre el valor del Uabs corresponde con un valor del estímulo elegido por el experimentador, lo más frecuente es que se situé entre dos valores del estímulo, por lo que se realiza una interpolación lineal (regla de tres) para averiguar el valor del estímulo que es percibido en el 50% de las ocasiones, si bien, lo más recomendable es obtenerlo por el método de mínimos cuadrados (Aznar, 2009).

3.2.3 Método de ajuste o error promedio

Recibe el nombre de método de ajuste porque en él, el sujeto debe ajustar o manipular la intensidad del estímulo hasta, que sea capaz de percibirlo (UAbs) o hasta que iguale a otro estímulo de comparación (Ud) (Aznar, 2009). La lógica de este método es similar a la de los límites, aunque bastante más simplificada dado que en lugar de llevar a cabo las series ascendentes o descendentes completas se parte de un punto medio fijo, fijado a priori (lo determina el investigador).

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la ventilación (V_E), el consumo de oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) el cociente respiratorio (RQ), y los equivalentes ventilatorios para el CO_2 y el O_2 , concentración de lactato en sangre mediante el modelo matemático psicofísico conocido como Ley de Weber-Fechner usando el método de los límites para la determinación del Umbral ventilatorio y el Umbral anaeróbico.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Medir durante una prueba incremental de ejercicio y en la recuperación pasiva: el cociente respiratorio (RQ), la ventilación (V_E), el consumo de oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) y los equivalentes ventilatorios para el CO_2 (VE/V_{CO_2}), y el O_2 (VE/VO_2).
2. Medir durante una prueba incremental de ejercicio y en la recuperación pasiva las concentraciones de lactato en sangre.
3. Analizar bajo el método de los límites de la ley de Weber-Fechner los resultados obtenidos y observar si es posible determinar los umbrales ventilatorio y anaeróbico por este método.
4. Contrastar los resultados de esta investigación con otros métodos para la determinación del umbral ventilatorio y anaeróbico.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE ESTUDIO

Elaboración de un proyecto para una investigación Descriptiva-transversal. Este proyecto es una investigación que propone un método alternativo para la identificación de los umbrales metabólicos conocidos como Umbral anaeróbico y Umbral Ventilatorio, analizando la respuesta de los indicadores fisiológicos durante una prueba de carga incremental seguida de una recuperación pasiva, a través del modelo matemático de Weber-Fechner utilizado en la teoría de los umbrales sensoriales.

Las variables a considerar durante el desarrollo del proyecto se agrupan en cuatro grupos:

1. Variables sociodemográficas.
2. Variables antropométricas.
3. Variables de la prueba.
4. Variables fisiológicas.

Siendo las tres primeras variables independientes y la cuarta las variables dependientes utilizadas en la investigación.

El proyecto de investigación resulta novedoso por utilizar una teoría de la psicofísica para cuantificar los estímulos sensoriales buscando su aplicabilidad en el campo de la fisiología del ejercicio. Esto conlleva un análisis de las variables dependientes, principalmente las asociadas al intercambio gaseoso con el fin de buscar cuál de ellas permite la determinación del umbral ventilatorio a partir del modelo matemático psicofísico. El umbral anaeróbico al presentar un solo marcador para su determinación como lo es la medición de las concentraciones de lactato en sangre permitirá una relación más precisa de los datos obtenidos durante la prueba de carácter incremental y su recuperación pasiva.

5.2. ESTRATEGIAS DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto de investigación utilizara las estrategias cuantitativas. Las variables fisiológicas obtenidas durante el desarrollo de las pruebas de ejercicio incremental permiten

su análisis descriptivo mediante el modelo matemático de Weber-Fechner de la Psicofísica para determinar el Umbral Ventilatorio y anaeróbico.

5.3. ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto de investigación se sitúa en el área del conocimiento afín a la Fisiología aplicada al ejercicio físico y el entrenamiento de rendimiento. La determinación de los umbrales metabólicos resulta de gran importancia en los procesos de control de las cargas de entrenamiento ya que a partir de estos puntos críticos presentes durante el ejercicio de intensidad submáxima se desencadenan una serie de respuestas metabólicas que pueden afectar el rendimiento deportivo. Resulta interesante aplicar el modelo matemático de Weber-Fechner de la psicofísica utilizado principalmente en la determinación de umbrales sensoriales, en la medición de los Umbrales anaeróbico y Ventilatorio a partir de estímulos mecánicos, posibilitando la comparación entre este método con los convencionales.

5.4. POBLACIÓN

10 sujetos varones voluntarios, sanos, sedentarios, comprendidos entre los 18 a 25 años.

5.5. VARIABLES

5.5.1. Variables sociodemográficas

Variable	Definición operacional	Tipo de variable	Valores posibles
Fecha de nacimiento	Fecha de nacimiento de los individuos en la forma: DD/MM/AA	Categórica nominal	dd/mm/aaaa
Sexo	Sexo del individuo	Categórica nominal	Masculino Femenino
Edad	Edad del individuo en años cumplidos	Cuantitativa continua	Rango entre 18 y 25

Ciudad	Ciudad de residencia del individuo	Categórica nominal	Ciudades de Colombia
Departamento	Departamento de residencia del individuo	Categórica nominal	32 departamentos de Colombia
País	País de residencia del individuo	Categórica nominal	Colombia

5.5.2. Variables antropométricas

Variable	Definición operacional	Tipo de variable	Valores posibles
Peso	Peso en Kilogramos (Kg) del individuo	Cuantitativa Continua	60,70.....n Kg
Talla	Talla en centímetros del individuo	Cuantitativa Continua	156, 167, 180....n cm
IMC	Relación entre el peso y el cuadrado de la talla según la fórmula: $IMC = \text{Peso}/(\text{Talla})^2$	Cuantitativa Continua	18,5 20,3 30,1n Kg/Mts ²

5.5.3. Variables de la prueba incremental

Variable	Definición operacional	Tipo de variable	Valores posibles
Fecha del test	Fecha de realización de la prueba de esfuerzo en la forma: DD/MM/AA	Categórica nominal	dd/mm/aaaa

Potencia (Watts)	Definida como $\text{Potencia} = \text{Fuerza} \times \text{distancia/tiempo}$	Cuantitativa continua	100 W, 120 W.... n W
Carga Incremental (Kg)	Tensión establecida en el cicloergómetro (resistencia)	Cuantitativa continua	20 Kg, 50 Kg..... n Kg
Revoluciones por minuto (rpm)	Frecuencia o cadencia de pedaleo en el cicloergómetro.	Cuantitativa continua	60 rpm, 66 rpm....n rpm
Tiempo de carga (minutos)	Tiempo en el cual se sostendrá una misma resistencia para avanzar a una superior durante la prueba.	Cuantitativa continua	1 minuto, 2 minutos... n minutos

5.5.4. Variables fisiológicas medibles durante la prueba incremental y la recuperación pasiva

Variable	Definición operacional	Tipo de variable	Valores posibles
Frecuencia cardiaca (FC)	Cantidad de latidos del corazón por minuto	Cuantitativa discreta	40 - 220
Predicción de la FC máx.	Frecuencia cardiaca máxima predicha a partir de ecuaciones matemáticas.	Cuantitativa discreta	220 - Edad
Presión arterial sistólica	Valor máximo de la presión arterial durante la sístole.	Cuantitativa discreta	60 - 220
Presión arterial diastólica	Valor máximo de la presión arterial durante la diástole.	Cuantitativa discreta	70 – 120

VO_2 relativo a la carga (mL/Kg/min)	Consumo de oxígeno obtenido en cada carga de trabajo	Cuantitativa continua	3,5 - 84
VO_2 relativo al peso (ml/kg/min)	Consumo de oxígeno por kilogramo de peso corporal	Cuantitativa continua	(3,5 – 84) x Peso corporal
Respuesta presorica	Milímetros de mercurio de la presión arterial sistólica por cada unidad metabólica	Cuantitativa continua	0 – 5 5 – 10 >10
Volumen tidal (L)	VC: Cantidad de aire movido por cada ciclo ventilatorio	Cuantitativa continua	0,4 L – 2,5 L
Ventilación por minuto (L/min)	V_E : Producto de la frecuencia respiratoria y el volumen tidal por minuto.	Cuantitativa continua	6 L/min – 120 L/min
VCO_2 (L/min)	Producción de dióxido de carbono en ejercicio	Cuantitativa continua	0,2 – 5,0
Cociente respiratorio (RQ)	Relación: VCO_2/VO_2	Cuantitativa continua	0,72 – 1,1
V_E/VCO_2	Equivalente ventilatorio para el dióxido de carbono	Cuantitativa continua	30 - 24
V_E/VO_2	Equivalente ventilatorio para el oxígeno	Cuantitativa continua	25 -40
VO_2/FC (mL/beat)	Relación entre el consumo de oxígeno y la frecuencia cardiaca.	Cuantitativa continua	5 – 30

MET	Equivalente metabólico para un esfuerzo físico.	Cuantitativa continua	1 MET – 25 MET
Índice calórico (Kcal/min)	Calorías gastadas durante un esfuerzo físico por unidad de tiempo	Cuantitativa continua	1 – 45
Nivel de depresión segmento ST	Descenso del segmento ST durante electrocardiograma de esfuerzo.	Categórica nominal	Si / No
Escala de Borg modificada	Escala de percepción de esfuerzo durante prueba de esfuerzo incremental	Cuantitativa Discreta	1 – 10
Doble producto	Producto entre la frecuencia cardiaca por la presión arterial sistólica	Cuantitativa Discreta	2400 – 48400
O_2 Exp (mL)	Cantidad de O_2 en el aire espirado	Cuantitativa continua	90 – 500
CO_2 Esp (mL)	Cantidad de CO_2 en el aire espirado	Cuantitativa continua	25 - 180
FeO_2 (%)	Fracción de oxígeno en el aire espirado	Cuantitativa continua	14 - 18
$FeCO_2$ (%)	Fracción de dióxido de carbono en el aire espirado	Cuantitativa continua	4 – 6
$FetO_2$ (%)	Concentración de oxígeno al final de la espiración	Cuantitativa continua	13 – 16
$FetCO_2$ (%)	Concentración de CO_2 al final de la espiración	Cuantitativa continua	5 - 7

FiO_2 (%)	Fracción inspirada de oxígeno	Cuantitativa continua	1 - 100 (normalmente 21%)
$FiCO_2$ (%)	Fracción inspirada de CO_2	Cuantitativa continua	1 - 100
$PeCO_2$ (mmHg)	Presión espiratoria media de CO_2	Cuantitativa continua	20 - 30
PeO_2 (mmHg)	Presión espiratoria media de O_2	Cuantitativa continua	70 - 80
$PetCO_2$ (mmHg)	Presión parcial de CO_2 del aire final de la espiración	Cuantitativa continua	20 - 40
$PetO_2$ (mmHg)	Presión parcial de O_2 del aire final de la espiración	Cuantitativa continua	70 - 120
Concentración de lactato en sangre (mmol/L)	Cantidad de lactato circulante en sangre	Cuantitativa Continua	1 - 20

5.6. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Los datos de las variables sociodemográficas las proporcionara el usuario a través de un cuestionario que desarrollara previo a la prueba.

Las mediciones antropométricas se realizarán mediante los equipos de medición:

- Bascula marca DETECTO.
- Tallímetro marca Soluciones Biomecánicas.

La información proporcionada por las variables fisiológicas se obtendrá a partir de los siguientes instrumentos de medición:

1. *Cosmed K5*. Sistema portable de análisis metabólico a partir de la medición del intercambio gaseoso (cociente respiratorio (RQ), la ventilación (V_E), el consumo de

oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) y los equivalentes ventilatorios para el CO_2 (VE/VCO_2), y el O_2 (VE/VO_2), etc).

2. *Analizador de lactato en sangre (Accutrend lactate - Roche)*. Analizador portable de lactato en sangre obtenida a partir de un pinchazo en la yema del dedo o del lóbulo de la oreja. Requiere la utilización de tiras reactivas donde se deposita la sangre recién extraída para la medición del contenido de lactato en sangre.
3. *Esfigmomanómetro y fonendoscopio Welch Allyn*. Para medición de la presión arterial sistólica y diastólica.
4. *Cicloergómetro Monark 828E*. Donde se monitorearán mediante el software las revoluciones por minuto (rpm), tiempo de pedaleo, velocidad del pedaleo, distancia recorrida, potencia generada, etc.
5. *Sensor de frecuencia cardiaca Polar*. Se sincroniza con el software del cicloergómetro Monark 828E para medir las pulsaciones por minuto durante la prueba.
6. *Electrocardiograma de esfuerzo*. Se utiliza electrocardiógrafo Digital PC ECG Machine QRS-Card Resting & exercise Test. Electrocardiografía de esfuerzo de 12 derivaciones para monitoreo de la función cardiaca durante el ejercicio.

La medición de las variables fisiológicas se realizará en la prueba incremental cada 2 minutos. En el mismo tiempo se elevarán los valores correspondientes a la carga aplicada en el cicloergómetro. Las revoluciones por minuto (rpm) deberán mantenerse entre 60 -70 rpm durante toda la prueba.

El espirómetro Cosmed K5 registra los datos del intercambio gaseoso automáticamente en el software. El técnico encargado de la prueba de esfuerzo se encargará de tomar las muestras de sangre mediante el medidor de lactato Accutrend Lactato cada dos minutos.

5.7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se aplicará el método de los límites del modelo matemático de Weber-Fechner para la detección del umbral ventilatorio y anaeróbico utilizando los indicadores tomados a partir de la prueba incremental y el periodo de recuperación.

Se hará un análisis univariado para la descripción de variables. Se trasladarán los datos a SPSS para la construcción de la tabla de relación de los resultados explicada en el método de los límites de la ley de Weber-Fechner. Se construirán los gráficos para la explicación del modelo. Interpretación de resultados.

5.8. ASPECTOS ÉTICOS

De acuerdo con los principios establecidos en la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud donde se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud y atendiendo al Artículo 11 de la misma resolución, este proyecto de investigación se clasifica como Investigación con riesgo Mínimo. Esta clasificación se otorga puesto que los procedimientos a realizar son principalmente evaluaciones físicas no invasivas en sujetos sanos. La prueba de carácter invasivo que se llevara a cabo durante el desarrollo de los test aplica como “extracción de sangre por punción venosa en adultos en buen estado de salud” y no superara las dos veces por semana como se estipula en el Artículo 11 de la Resolución 008430/93 (Ministerio de Salud, 1993).

Este proyecto tiene como objetivo contribuir al conocimiento de los procesos biológicos centrando los esfuerzos en la medición de los umbrales metabólicos durante ejercicio físico y recuperación pasiva, tomando como referencia el método de los límites del modelo matemático psicofísico de Weber-Fechner.

Puesto que la investigación tomara como objeto de estudio a seres humanos, el proyecto se ajusta al Artículo 5 de la Resolución 008430/93 (Ministerio de Salud, 1993), respetando los derechos, la dignidad y el bienestar de los sujetos de estudio.

En respuesta a los criterios mencionados en el Artículo 6 de la Resolución 8430/93 (Ministerio de Salud, 1993), las pruebas a realizar durante la investigación han sido probadas en humanos y animales sin tener un riesgo alto de ejecución. La medición del Umbral Ventilatorio y el Umbral anaeróbico tiene una base teórica importante que justifica la investigación al ser abordada por diferentes autores con anterioridad desde diferentes métodos usando pruebas de carácter incremental en cicloergómetro analizando las diferentes variables fisiológicas con equipos espirométricos y analizadores de lactato en sangre.

El estudio se llevará a cabo en participantes voluntarios que recibirán previamente información sobre la investigación, además de notificarles cuáles serán los procedimientos realizados durante las pruebas con sus respectivos riesgos y garantías de seguridad.

La investigación se desarrollará cuando se obtenga la autorización: del representante legal de la institución investigadora y de la institución donde se realice la investigación; el consentimiento informado de los participantes; y la aprobación del proyecto por parte del Comité de Ética en investigación de la institución.

6. CONCLUSIONES

Esta monografía de investigación busca generar una nueva perspectiva de análisis para el metabolismo energético abordando su comprensión desde la Teoría General de Sistemas. En este aspecto, la célula es tomada como un sistema abierto que intercambia materia y energía con su entorno con comportamiento conservador, por lo cual recibe elementos tales como los macronutrientes (input) para ser metabolizados a través de mecanismos complejos que se comportan como bucles de retroalimentación, como, por ejemplo: transporte, absorción, difusión, etc., todos autorregulados. Estos mecanismos ocurren en subsistemas jerárquicos como en el citoplasma celular y las mitocondrias y otras organelas.

La medición indirecta de estos procesos energéticos al interior de las células puede medirse de diferentes formas, por ejemplo: a través del calor producido, de la potencia producida o de los umbrales metabólicos, entre otros.

Los umbrales han sido determinados por diferentes autores utilizando pruebas de esfuerzo de carácter incremental buscando el punto de inflexión de diferentes variables fisiológicas tales como el lactato en sangre, el nivel de catecolaminas o la variación en el intercambio de gases. De esta forma aparecen modelos de determinación como el de 2 y 4 mmol de lactato en sangre, el V-Slope, el RQ, el modelo trifásico de Skinner y McIlan.

Esta monografía en contraste con lo ya propuesto busca:

1. Proponer un modelo para la medición de los umbrales metabólicos (anaeróbico y ventilatorio).
2. Proponer por primera vez la aplicación del método matemático de los límites de Weber-Fechner en el ámbito de la fisiología del ejercicio.

Creemos que la propuesta es innovadora porque aporta al campo de conocimiento al usar una teoría proveniente de la psicofísica en la fisiología del ejercicio aplicada al entrenamiento, para la cual no encontramos referencias al construir el marco teórico de esta propuesta.

Este trabajo puede servir para ser aplicado en el control de cargas de entrenamiento en la educación física de escolares; en la salud tanto en prevención, curación y rehabilitación y en el alto rendimiento atlético.

7. BIBLIOGRAFIA

- Aznar, J. (2009). *Introducción a la psicofísica*. Recuperado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/9922>
- Calderón, F., Benito, P., Butragueño, J., Díaz, V., Peinado, A., Álvarez, M., . . . Castillo, M. (2009). Recuperación de la frecuencia cardíaca y ventilación, y su relación con la lactacidemia, tras una prueba de esfuerzo en jóvenes deportistas. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, 2(3), 87-92. Recuperado de <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-andaluza-medicina-del-deporte-284-articulo-recuperacion-frecuencia-cardiaca-ventilacion-su-X1888754609428661>
- Chaman, K. y Padulo, J. (2016). Términos “aeróbico y anaeróbico”, utilizados en fisiología del ejercicio. Una reflexión crítica sobre la terminología. *PubliCE*. Recuperado de <https://g-se.com/terminos-aerobico-y-anaerobico-utilizados-en-fisiologia-del-ejercicio-una-reflexion-critica-sobre-la-terminologia-2059-sa-157cfb27274e7f>
- DiLeo, T., Powell, J., Kang, H. K., Roberge, R., Coca, A. y Kim, J. H. (2016). Effect of Short-Term Heat Acclimation Training on Kinetics of Lactate Removal Following Maximal Exercise. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 56(1-2), 70–78. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25286892>
- Edwards, A., Clark, N. y Macfadyen, A. (2003). Lactate and Ventilatory Thresholds Reflect the Training Status of Professional Soccer Players Where Maximum Aerobic Power is Unchanged. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(1), 23-39. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3937571/>
- Facey, A., Irving, R. y Dilworth, L. (2013). Overview of Lactate Metabolism and the Implications for Athletes. *American Journal of Sports Science and Medicine*, 1(3), 42-46. doi:10.12691/ajssm-1-3-3
- Ferliche, B. y Delgado, M. (1996). Evolución y aplicación práctica del umbral anaeróbico en el entrenamiento deportivo. Revisión. *Revista Motricidad*, 2, 39-53.
- Ferreira, J., Da Silva, R., Barroso, T., Szmuchrowski, L. y Śledziwski, D. (2011). Effect of Different Types of Recovery on Blood Lactate Removal After Maximum Exercise.

Polish Journal of Sport and Tourism, 18(2), 105-111. doi: 10.2478/v10197-011-0008-4

Fontes, S. y Fontes, A. (1994). Consideraciones teóricas sobre las leyes psicofísicas. *Revista de Psicología General y Aplicada: Revista de la Federación Española de Asociaciones de Psicología*, 47(4), 391-395.

Friedman, J. (2002). Metabolismo de la glucosa en el músculo esquelético. *PubliCE*. Recuperado de <https://g-se.com/metabolismo-de-la-glucosa-en-el-musculo-esqueletico-134-sa-n57cfb27107536>

Garrido, A. (2005). *Fundamentos de bioquímica metabólica*. Argentina: Alfaomega Grupo Editor.

Gladden, B. (2014). Una perspectiva “láctica” sobre el Metabolismo. *PubliCE*. Recuperado de <https://g-se.com/una-perspectiva-lactica-sobre-el-metabolismo-1744-sa-G57cfb27246072>

Gladden, L. (2004). Lactate Metabolism: A New Paradigm for the Third Millennium. *Journal of Physiology*, 5-30. doi: 10.1113/jphysiol.2003.058701

Gómez, S. y Urdampilletab, A. (2012). El GLUT4: efectos de la actividad física y aspectos nutricionales en los mecanismos de captación de glucosa y sus aplicaciones en la diabetes tipo 2. *Diabetología*, 28(1), 19-26. doi:10.1016/j.avdiab.2012.02.003

Gonzales, J., Lira, L. y Sánchez, Á. (2010). *Calorimetría adiabática y sus aplicaciones*. México: Centro Nacional de Metrología (CENAM). Recuperado de <https://www.cenam.mx/sm2010/info/carteles/sm2010-c38.pdf>

Juel, C. y Halestrap, A. (1999). Lactate Transport in Skeletal Muscle - Role and Regulation of the Monocarboxylate Transporter. *Journal of Physiology*, 633-642. doi: 10.1111/j.1469-7793.1999.0633s.x

Karlman, W., Hansen, J. E., Sue, D. Y., Casaburi, R. y Whipp, B. J. (1999). *Principles of Exercise Testing & Interpretation*. Filadelfia, Estados Unidos: Lippincott Williams & Wilkins.

- Koutedakis, Y. y Sharp, N. (1985). Lactic Acid Removal and Heart Rate Frequencies During Recovery after Strenuous Rowing Exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 19(4), 192-202. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4092140>
- López, J. y Fernández, A. (2006). *Fisiología del ejercicio* (3 Ed.). Buenos Aires, Argentina: Médica Panamericana.
- López, J. y Legido, J. (1991). *Umbral anaerobico: bases fisiológicas y aplicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- López, J. y Legido, J. C. (1991). *Umbral anaerobio: bases fisiológicas y aplicaciones*. Madrid: Interamericana.
- Martin, A., Millán, C. y Llop, F. (2007). Presente y futuro del ácido láctico. *Archivos de Medicina del Deporte*, 24(120), 270-284. Recuperado de http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/Revision_acido_lactico_270_120.pdf
- Masferrer, D. (2014). *G-SE*. Recuperado de <https://g-se.com/primer-umbral-ventilatorio-bp-O57cfb26e7a57e>
- McArdle, W., Katch, F. y Katch, V. (2015). *Fisiología del ejercicio, rendimiento y salud* (8 Ed.). Barcelona, España: Wolters Kluwer Health.
- Menzies, P., Menzies, C., McIntyre, L., Paterson, P., Wilson, J. y Kemi, O. (2010). Blood Lactate Clearance During Active Recovery After an Intense Running Bout Depends on the Intensity of the Active Recovery. *Journal of Sports Medicine*, 28(9), 975–982. doi: 10.1080/02640414.2010.481721
- Ministerio de Salud. (1993). *Resolución número 8430 de 1993*. Bogotá, Colombia: Autor. Recuperado de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
- Mollinedo, M. y Benavides, G. (2014). Carbohidratos. *Revista de Actualización Clínica*, 41, 2133-2136.

- Moxnes, J. F. y Sandbakk, Ø. (2012). The Kinetics of Lactate Production and Removal During Whole-Body Exercise. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 9(7). doi: 10.1186/1742-4682-9-7.
- Munar, E., Sánchez, A. y Roselló, J. (1999). *Atención y percepción*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Murray, R., Bender, D., Botham, K., Kennelly, P., Rodwell, V. y Weil, P. A. (2010). *HARPER. Bioquímica ilustrada*. México, D.F: McGraw Hill.
- Nelson, D. y Cox, M. (2009). *Lehninger: principios de bioquímica*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Olivares, J. A. y Arellano, A. (2008). Bases moleculares de las acciones de la insulina. *Revista de Educación Bioquímica*, 27(1), 9-18.
- Rabadán, I. y Rodríguez, A. (2010). La fisiología del ejercicio básica dentro de la educación secundaria: una aproximación conceptual a través de la revisión del temario para oposiciones. *EFDeportes*, 148. Recuperado de <http://www.efdeportes.com/efd148/la-fisiologia-del-ejercicio-del-temario-para-oposiciones.htm>
- Ren, J., Dean, A. y Malloy, C. (2013). Noninvasive Monitoring of Lactate Dynamics in Human Forearm Muscle After Exhaustive Exercise by ¹H-Magnetic Resonance Spectroscopy at 7 Tesla. *Magnetic Resonance in Medicine*, 70(3), 610-619. doi: 10.1002/mrm.24526
- Ribas, J. (2010). Lactato: de indeseable a valioso metabolito. *Archivos de Medicina del Deporte*, 27(137), 211-230. Recuperado de http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/Revision_Lactato_211_137.pdf
- Sanchis, C. (2014). *G-SE*. Recuperado de <https://g-se.com/segundo-umbral-ventilatorio-bp-V57cfb26e7a938>

- Sandoval, R., Vargas, B., Flores, L. y Gurrola, C. (2016). Glucotransportadores (GLUT): aspectos clínicos, moleculares y genéticos. *Gaceta Médica de México*, 152(4), 547-557.
- Stavrianeas, S. y O’Leary, C. B. (2003). Frecuencia respiratoria y umbral ventilatorio en participantes desentrenados y sedentarios. *PubliCE*. Recuperado de <https://g-se.com/frecuencia-respiratoria-y-umbral-ventilatorio-en-participantes-desentrenados-y-sedentarios-1469-sa-057cfb2721a44b>
- Vázquez, E., Rosas, S., Pérez, G. y Peimbert, M. (2010). De la bioenergética a la bioquímica del ATP. *ContactoS*, 39-45.
- Verhoshansky, Y. y Siff, M. (2000). *Superentrenamiento*. Barcelona, España: Paidotribo.

ANEXOS

CONSENTIMIENTO INFORMADO:

INFORMACION GENERAL DEL PROYECTO PARA FIRMA DEL CONSENTIMIENTO INFORMADO

Se realizará la investigación con el tema: Determinación del Umbral ventilatorio y Umbral anaeróbico bajo el concepto de la psicofísica usando del modelo matemático de Weber-Fechner para la medición de los umbrales sensoriales.

Investigador principal: _____

Lugar donde se realiza el estudio: _____

Nombre del participante: _____

A usted se le está invitando a participar de este estudio de investigación de manera libre y voluntaria. Antes de decidir su participación en el mismo, deberá leer y comprender la siguiente información. Está en la libertad de preguntar a los responsables cualquier duda que le surja durante su lectura.

Una vez aclaradas las dudas y en comprensión total de la información, si desea participar de la investigación se le pedirá que firme el consentimiento, de la cual recibirá una copia firmada y fechada.

JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

El modelo matemático de Weber-Fechner para la medición de los Umbrales sensoriales no ha sido aplicado en la determinación de los umbrales metabólicos. Consideramos que este modelo que surgió en la psicofísica es una propuesta novedosa para la medición del Umbral Ventilatorio y anaeróbico que podría generar interrogantes en el campo de la fisiología del ejercicio.

Objetivo general

Analizar la ventilación (V_E), el consumo de oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) el cociente respiratorio (RQ), y los equivalentes ventilatorios para el CO_2 y el O_2 , concentración de lactato en sangre mediante el modelo matemático psicofísico conocido como Ley de Weber-Fechner usando el método de los límites para la determinación del Umbral ventilatorio y el Umbral anaeróbico.

Objetivos específicos

1. Medir Durante una prueba incremental de ejercicio y en la recuperación pasiva: el cociente respiratorio (RQ), la ventilación (V_E), el consumo de oxígeno (VO_2), la producción de CO_2 (V_{CO_2}) y los equivalentes ventilatorios para el CO_2 (VE/V_{CO_2}), y el O_2 (VE/VO_2).
2. Medir Durante una prueba incremental de ejercicio y en la recuperación pasiva las concentraciones de lactato en sangre.
3. Analizar bajo el método de los límites de la ley de Weber-Fechner los resultados obtenidos y observar si es posible determinar los umbrales ventilatorio y anaeróbico por este método.
4. Contrastar los resultados de esta investigación con otros métodos para la determinación del umbral ventilatorio y anaeróbico.

PROCEDIMIENTOS DEL ESTUDIO

Si usted acepta participar en la investigación y reúne los criterios para poder hacerlo, se le realizarán las siguientes pruebas y procedimientos:

- Se le solicitara que llene un cuestionario con su información sociodemográfica (Edad, País, Ciudad, Departamento, Sexo).
- Los investigadores encargados le medirán su peso, talla e IMC (índice de masa corporal).
- Se le pedirá realizar una prueba de esfuerzo de carácter incremental hasta el agotamiento en una bicicleta ergo métrica, donde se analizarán una serie de variables fisiológicas tales como: Frecuencia Cardíaca, presión arterial, consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono, ventilación por minuto, etc. Todas estas variables se analizarán mediante instrumentos de carácter no invasivo (Esfigmomanómetro y

fonendoscopio, sensor de frecuencia cardiaca ubicado en el pecho, espirómetro portátil Cosmed K5).

- Durante el desarrollo de la prueba, se le tomara cada cierto tiempo una muestra de sangre mediante un pinchazo en el lóbulo de la oreja o un dedo de la mano para medir las concentraciones de lactato en sangre con el instrumento de medición Acutrend Lactate - Roche.
- Al terminar la prueba se le solicitara que repose por 30 minutos sentado en el cicloergómetro mientras se siguen tomando datos con los instrumentos de medición usados durante la prueba.
- Los datos serán tratados de forma confidencial y los nombres de los participantes no serán tenidos en cuenta durante en análisis de los resultados.
- El análisis de los resultados se realizará mediante el modelo matemático de Weber-Fechner generando la relación entre los resultados de los datos obtenidos durante la prueba incremental y su recuperación con el fin de determinar la aplicación de este modelo en la predicción del Umbral Ventilatorio.

RIESGOS DE LA INVESTIGACIÓN

Durante la prueba de ejercicio incremental usted podría presentar alguno de los siguientes síntomas:

- Fatiga o cansancio físico.
- Hiperventilación por esfuerzo físico.
- Aumento de la frecuencia cardiaca.
- Aumento de la presión arterial sistólica.
- Aumento de la temperatura corporal.
- Mareos, molestias en el pecho o dificultad para respirar.
- Dolor o molestia en el lugar donde se pincha para recolectar la muestra de sangre.
- Ardor o enrojecimiento en el lugar donde se pincha para recolectar la muestra de sangre.

ACLARACIONES

- La decisión de participar en el estudio es completamente voluntaria.
- Si decide participar en el estudio podrá retirarse cuando lo desee, aun cuando el investigador responsable no se lo solicite, pudiendo informar o no las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.
- Durante la prueba, podrá detenerse en el momento que lo considere pertinente, aun cuando el investigador responsable no lo hay indicado.
- Usted podrá pedir los resultados de sus pruebas una vez terminada su participación los cuales le serán enviados vía correo electrónico en un plazo no superior a 6 meses.

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria.

- Entiendo que no recibiré ninguna compensación económica por mi participación en la investigación.
- Los resultados de la investigación servirán para generar un modelo diferente que permita medir el Umbral Ventilatorio que se utiliza frecuentemente en el ámbito de la salud, la educación y el alto rendimiento atlético.
- Entiendo que toda la información que proporcione para la investigación será confidencial y sólo será conocida por las personas que trabajan en este estudio. Por consiguiente, al publicar los resultados no podrá ser revelada mi identidad.
- También entiendo que tengo el derecho a negarme a participar, o retirarme del estudio en el momento que así lo desee.

Certifico que he leído la información, el consentimiento y los he entendido. Así mismo, que se me dio la oportunidad de aclarar cualquier duda sobre el estudio, y se me informó que puedo comunicarme con Danilo Enrique Ramírez Santacruz, estudiante en _____ dé _____ al teléfono 3165365352 de Cali o escribir al correo electrónico danilo0613@hotmail.com en caso de tener cualquier problema o duda con relación a la investigación, además de esto si tengo alguna duda

adicional podré comunicarme con El Comité de Ética Humana de _____, sede _____, el número de contacto es _____, estudio con aval ético con código _____.

Confirmando que entendí las explicaciones: Si ☐ No ☐

Acepto participar en el estudio? Si ☐ No ☐

Huella

Nombre del participante: _____

Firma del participante: _____

No Cédula: _____ Fecha _____

Nombre del testigo 1: _____

Firma del testigo: _____

No Cédula: _____ Fecha _____

Huella

Nombre del testigo 2: _____

Firma del testigo: _____

No Cédula: _____ Fecha _____

Huella

Nombre del Investigador: _____

Firma del investigador: _____

No Cédula: _____ Fecha _____

Consentimiento para pruebas de esfuerzo.