



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**VARIABLES BIOQUÍMICAS Y DEL
DESEMPEÑO DEL SALTO
CONTRAMOVIMIENTO PARA MONITORIZAR
LA FATIGA NEUROMUSCULAR EN
DEPORTISTAS DE RESISTENCIA**

Cristian Andrés Yánez Constante

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Medicina

Maestría en Fisiología

Bogotá, Colombia

2016

VARIABLES BIOQUÍMICAS Y DEL DESEMPEÑO DEL SALTO CONTRAMOVIMIENTO PARA MONITORIZAR LA FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS DE RESISTENCIA

Cristian Andrés Yáñez Constante

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Fisiología

Director:

MD. MSc. Mauricio Serrato Roa

Línea de Investigación:

Fisiología del Ejercicio

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Medicina

Maestría en Fisiología

Bogotá, Colombia

2016

Dedicatoria

Gracias a Dios por este proceso de aprendizaje y esfuerzo, a mi esposa, mi hijo y a mis familiares quienes me brindaron su apoyo incondicional para lograr los sueños y metas anheladas. A mis profesores y amigos por brindarme sus enseñanzas y experiencias.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales a los profesores del Departamento de Ciencias Fisiológicas de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia por sus grandes aportes en mi formación académica. En especial a mi director de tesis, Profesor Mauricio Serrato por su gran apoyo, dedicación y continua enseñanza.

Agradecimientos a cada uno de los deportistas y personas que participaron en la investigación. A todo el personal del Centro de Ciencias del Deporte por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Una mención importante desde el inicio del proyecto al Doctor Jairo Zuluaga.

Un reconocimiento especial al PhD Daniel Cohen por su valioso aporte en la asesoría, retroalimentación del estudio, apoyo científico y tecnológico durante el proceso investigativo.

VARIABLES BIOQUÍMICAS Y DEL DESEMPEÑO DEL SALTO CONTRAMOVIMIENTO PARA MONITORIZAR LA FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS DE RESISTENCIA

Resumen

La propuesta de este estudio fue determinar las variables directas de fatiga neuromuscular aguda (FNM) y su relación con la prueba bioquímica (CPK) pre y pos entrenamiento a través del análisis de desempeño del salto contra movimiento (CMJ) en deportistas de resistencia. **Métodos:** Ocho atletas masculinos de rendimiento en resistencia realizaron 3 ensayos CMJ en plataforma de fuerza, antes y después de un protocolo de fatiga de carrera intermitente de alta intensidad (Protocolo fatigante al máximo ritmo de trabajo posible para cada repetición). Un total de 8 variables fueron analizadas a través del salto contra movimiento (CMJ) y el biomarcador (CPK) antes y después del protocolo de fatiga. Pico de potencia (PP), fuerza promedio (MF), tiempo a la fuerza pico (TTPF), tiempo de contracción (CT) altura del salto (JH), relación tiempo de vuelo / tiempo de contracción (FT:CT) fosfocreatinquinasa (CPK), tiempo de vuelo (FT). Los datos fueron analizados por medio del test no paramétrico de Wilcoxon y la correlación de Spearman. **Resultados:** no se encontraron diferencias significativas para las variables de fuerza promedio ($p=0,889$), tiempo a la fuerza pico ($p=0,483$), altura del salto ($p=0,093$), tiempo de vuelo. ($P=0,125$), relación TV: TC ($p=0,161$) y fosfocreatinquinasa (CPK) ($p=0,575$) ($p>0,5$). Se encontraron diferencias significativas en variables de pico de potencia ($p=0,017$) y tiempo de contracción ($p=0,036$). Se encontraron relaciones directas por medio del coeficiente de correlación de Spearman entre: Δ tiempo a la fuerza pico y Δ CPK ($p=0,015$) ($r=-0,810$) y Δ tiempo de vuelo – Δ CPK. ($p=0,015$) ($r=0,810$). **Conclusiones:** El presente estudio es una investigación piloto que reporta la monitorización de la fatiga neuromuscular en deportistas de resistencia, mediante el análisis de las variables de desempeño del salto contra movimiento (CMJ) y la variable bioquímica (CPK) evaluadas en plataforma de fuerza. Los datos de la FNM en deportes explosivos y acíclicos se han reportado extensamente, sin embargo los deportistas de resistencia han mostrado un comportamiento diferente en la FNM. No obstante se encontró que a pesar de no haber cambios en la altura del salto, pico de potencia (PP) y tiempo de contracción (CT) fueron buenos indicadores de (FNM) en estos deportistas. La (FNM) es un evento que debe ser evaluado sistemáticamente con plataformas de fuerza.

Palabras claves: deporte de resistencia, fatiga neuromuscular, monitoreo en atletas, salto contra movimiento CMJ.

BIOCHEMICAL VARIABLES AND PERFORMANCE OF COUNTER MOVEMENT JUMP FOR MONITORING NEUROMUSCULAR FATIGUE IN ENDURANCE ATHLETES

Abstract

The purpose of this study was to determine the direct variables of acute neuromuscular fatigue (FNM) and their relationship with biochemical tests (CPK) pre and post training through performance analysis counter movement jump (CMJ) in endurance athletes. **Methods:** Eight male athletes of endurance performance tests performed 3 CMJ in force plate before and after fatigue protocol intermittent high-intensity running (exhausting the maximum rate possible job for each repetition Protocol). A total of 8 variables were analyzed through counter movement jump (CMJ) and the biomarker (CPK) before and after the fatigue protocol. Peak power (PP), average force (MF), time to peak force (TTPF), contraction time (CT) jump height (JH), regarding flight time / contraction time (FT: CT) phosphocreatinekinase (CPK), flight time (FT). Data were analyzed using the non-parametric Wilcoxon test and Spearman correlation. **Results:** no significant differences for the variables of average strength ($p = 0.889$), time to peak force ($p = 0.483$), jump height ($p = 0.093$), time of flight found. ($P = 0.125$), FT: CT ($p = 0.161$) and phosphocreatinekinase (CPK) ($p = 0.575$) ($p > 0.5$). Significant differences in variables of peak power ($p = 0.017$) and contraction time ($p = 0.036$) were found. The Spearman correlation coefficient had a direct relations between the delta of the variables: Δ Time to peak force - Δ CPK ($p=0,015$) ($r=-0,810$) and Δ flight time and Δ CPK ($p=0,015$) ($r=0,810$). **Conclusions:** This study is a pilot research reports monitoring the neuromuscular fatigue endurance athletes, by analyzing the performance variables jump against movement (CMJ) and biochemical variable (CPK) evaluated in force platform. FNM data and acyclic sports explosives have been reported widely, but endurance athletes have shown a different behavior in the FNM. However it was found that despite no change in jump height, peak power (PP) and contraction time (CT) were good indicators (FNM) in these athletes. The (FNM) is an event that should be evaluated systematically with force platforms.

Keywords: countermovement jump CMJ, endurance sport, monitoring athletes, neuromuscular fatigue.

CONTENIDO

Resumen.....	5
Introducción.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. Definición del problema	16
1.2. Pregunta	18
1.3. Delimitación del problema.....	19
1.4. Hipótesis Nula.....	19
1.5. Hipótesis alterna	19
2. Justificación.....	21
3. Objetivos	22
3.1. Objetivo general.....	22
3.2. Objetivos específicos	22
4. MARCO TEÓRICO.....	23
4.1. Fatiga muscular	23
4.2. Causas de fatiga muscular.....	24
4.3. Reclutamiento de unidades motoras.....	25
4.4. Unidades motoras y tamaño del músculo	27
5. TIPOS DE CONTRACCIÓN MUSCULAR.....	28
5.1. Generación de fuerza	29
5.2. Frecuencia de estimulación de las unidades motoras.	29
5.3. Longitud de las fibras musculares y los sarcómeros.....	30
5.4 Velocidad de contracción.....	32
6. METABOLISMO FUNCIONAL MUSCULAR	34
6.1. Fibras Tipo I.....	34
6.2. Fibras intermedias o tipo IIA	35
6.3. Fibras blancas, rápidas IIb.....	35

7. MODELOS FISIOLÓGICOS DE FATIGA Y EJERCICIO	37
7.1. Modelo cardiovascular anaeróbico:	37
7.2. Modelo de agotamiento y suministro de energía:	39
7.3. Modelo de reclutamiento muscular y potencia:	41
7.4. Modelo biomecánico:	43
8. FATIGA NEUROMUSCULAR AGUDA EN EL DEPORTE	44
8.1. Rendimiento y función:	44
8.2. Metabólico:.....	44
8.3. Neurofisiológico:	45
8.4. Iónico:	46
8.5. Fuente de energía:.....	46
9. VARIABLES BIOQUÍMICAS.....	47
9.1. Marcadores del estado funcional muscular: fosfocreatinquinasa (CPK)	47
10. FIBRAS MUSCULARES Y DEPORTE DE RESISTENCIA.....	49
10.1. MANIFESTACIONES DE LA FUERZA.....	51
10.1.1. Fuerza absoluta:.....	51
10.1.2. Fuerza isométrica máxima o fuerza estática máxima:.....	51
10.1.3. Fuerza máxima excéntrica:	52
10.1.4. Fuerza dinámica máxima (FDM):	52
10.1.5. Fuerza dinámica máxima relativa:.....	52
10.1.6. Fuerza dinámica máxima relativa específica:.....	52
10.1.7. Fuerza explosiva:	52
10.1.8. Fuerza explosiva máxima:.....	53
10.1.9. Fuerza elástico explosiva:	53
10.1.10. Fuerza elástico-explosivo-reactiva:	53
11. SALTABILIDAD	55
12. VALORACIÓN DE LA FATIGA.....	56
12.1. Salto contra movimiento (CMJ)	56
12.2. Variables de saltabilidad y fatiga neuromuscular en plataforma	57

12.3.	Altura del salto como medida de fatiga neuromuscular aguda	58
12.4.	Ciclo estiramiento acortamiento (SSC).....	61
12.5.	Relación entre el tiempo de vuelo y el tiempo de contracción durante el salto contra movimiento (FT: CT).....	61
12.6.	Fases del salto contra movimiento	62
12.6.1.	(Fase de ascenso - despegue): (Bosco et al, 1979).....	62
12.6.1.1.	Promedio de fuerza concéntrica:.....	62
12.6.1.2.	Promedio de fuerza excéntrica:.....	63
12.6.1.3.	Promedio del índice de fuerza concéntrica desarrollada:.....	63
12.6.1.4.	Pico de fuerza concéntrica:	63
12.6.1.5.	Pico de velocidad concéntrica:.....	63
12.6.1.6.	Pico de fuerza relativa concéntrica:	63
12.6.1.7.	Tiempo de pico de fuerza concéntrica:	64
12.6.1.8.	Tiempo de vuelo:.....	64
12.6.1.9.	Altura de salto:	64
12.6.1.10.	Pico de potencia:	64
12.6.1.11.	Pico de potencia relativo:	64
12.6.2.	(Fase de descenso - aterrizaje).....	64
12.6.2.1.	Índice de fuerza desarrollada en el aterrizaje:.....	64
12.6.2.2.	Pico de fuerza de aterrizaje:.....	65
12.6.2.3.	Pico relativo de fuerza de aterrizaje:	65
13.	ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SALTO CONTRA MOVIMIENTO CON EL SOFTWARE INFORMÁTICO DE MEDICIÓN.....	66
14.	MARCO DE REFERENCIA	68
14.1.	MARCO METODOLÓGICO.....	70
14.1.1.	Tipo de Estudio	70
14.1.2.	Aspectos éticos	70
14.1.3.	Consentimiento informado.....	70
14.1.4.	Población objeto.....	71
14.1.5.	Criterios de inclusión y exclusión	71
14.2.	Metodología.....	72
14.2.1.	Convocatoria de voluntarios y socialización de estudio	72

14.2.2.	Valoración	72
14.2.3.	Pre test.....	72
14.2.4.	Protocolo fatigante	75
14.2.5.	Post test	76
14.2.6.	Variables	76
14.2.7.	Intervención.....	76
14.2.8.	Instrumentos de recolección de información	76
15.	Análisis estadístico	77
16.	RESULTADOS	78
16.1.	Diferencias pre y pos protocolo de fatiga.....	79
16.1.2.	Normalidad de los datos.....	79
17.	DISCUSIÓN.....	89
18.	CONCLUSIONES.....	97
19.	RECOMENDACIONES.....	99
20.	LIMITACIONES	100
21.	Bibliografía	104

Lista de Figuras

Figura 1. Deformación elástica de las fibras musculares (pre estiramiento y acortamiento).	28
Figura 2. Sumación de frecuencia y tetanización.....	30
Figura 3. Longitud de sarcómero en relación con la tensión desarrollada en porcentaje. 31	
Figura 4. Relación de la longitud muscular y tensión antes y durante la contracción muscular.....	31
Figura 5. Relación de la carga y la velocidad de contracción del músculo esquelético. ..	33
Figura 6. Características de los diferentes tipos de unidades motoras.	36
Figura 7. Modelo cardiovascular anaeróbico	38
Figura 8. Modelo de fatiga.....	40
Figura 9. Modelo de fatiga neuromuscular.....	42
Figura 10. Modelos biomecánico de fatiga.	43
Figura 11. Curva Fuerza /Tiempo (f/t).....	53
Figura 12. Tipos de contracción muscular	54
Figura 13. Salto contra movimiento relación FT: CT	62
Figura 14. Fases del salto contra movimiento.	66
Figura 15. Salto contra movimiento.	73
Figura 16. Gráfico del salto contra movimiento.....	74
Figura 17. Protocolo de fatiga intermitente y de alta intensidad.....	75
Figura 18. Variables de pico de potencia pre y pos test.....	81
Figura 19. Variables de fuerza promedio pre y pos test.....	82
Figura 20. Variables de tiempo a la fuerza pico pre y pos test.....	82
Figura 21. Variables de tiempo de contracción pre y pos test.....	83
Figura 22. Variables de altura del salto pre y pos test	83
Figura 23. Variables de TV: TC pre y pos test	84
Figura 24. Variables de CPK pre y pos test	84
Figura 25. Variables de tiempo de vuelo pre y pos test	85
Figura 26. Correlación \wedge Tiempo a la fuerza - \wedge CPK	88
Figura 27. Correlación \wedge Tiempo de vuelo - \wedge CPK	88

Lista de Tablas

Tabla 1. Definición de términos variables del salto contra movimiento CMJ	69
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión	71
Tabla 3. Datos demográficos de la muestra	78
Tabla 4. Prueba de shapiro wilk	80
Tabla 5. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo.....	81
Tabla 6. Correlación delta de variables	87

Introducción

Dentro del campo deportivo, la fatiga neuromuscular es un asunto importante en la medida en que evidencia diversos cambios en los procesos fisiológicos del organismo relacionados con el musculo esquelético, debido a la acumulación de productos metabólicos residuales producidos por el aumento de fosfato inorgánico (Pi) que reduce la generación de fuerza.

En primer lugar es importante señalar que las alteraciones en la concentración de lactato muscular, iones de hidrógeno (H^+), iones de calcio (Ca^{2+}) y potasio (K^+) están relacionados con la fatiga (McKenna et al., 2008). Por consiguiente la regulación de este estado iónico se convierte en fundamental para la excitación de la membrana muscular, la contracción y el metabolismo energético (Allen et al., 2008).

En segundo término, los estudios han constatado que al generar alteraciones en la excitación y la eficacia de la transmisión neuromuscular (fatiga periférica), se produce disminución de la contracción máxima voluntaria al momento de realizar un ejercicio o competencia deportiva. (Gandevia, 2001).

Por otra parte, el desarrollo de la fatiga neuromuscular periférica se define como de carácter progresivo (Gandevia, 2001) dependiendo de la intensidad y la duración del ejercicio realizado (Enoka y Stuart, 1992). Así mismo, la aparición de dicha fatiga se relaciona con la aparición del daño muscular (microlesión), el cual se registra dentro de la valoración funcional de la aptitud de los atletas. En sentido, es preciso tener en consideración que tanto la enzima fosfocreatina quinasa (CPK) como la lactato deshidrogenasa (LDH) dan una indicación del grado de adaptación metabólica a la deformación física de los músculos esqueléticos.

Estas enzimas están implicadas en el metabolismo muscular y su concentración en suero es normalmente muy baja, debido al desgaste y deterioro fisiológico de la célula. Adicionalmente, dichas enzimas aumentan considerablemente después del ejercicio intenso y en la patología muscular. (Brancaccio, et al, 2006)

También es necesario indicar que el nivel sérico de las enzimas del músculo esquelético es un marcador funcional del estado del tejido muscular. Un aumento en estas enzimas puede representar no solo un índice de necrosis celular sino también un daño tisular secundario con efectos agudos y crónicos por ejercicio intenso.

Es importante anotar que los cambios en los niveles séricos de enzimas e isoenzimas se encuentran también en sujetos normales y en los atletas después del ejercicio vigoroso. La cantidad enzimática generada por la actividad muscular a través de la fosfocreatinaquinasa (CPK) demuestra la exigencia hacia las fibras musculares según la duración e intensidad del entrenamiento. (Brancaccio, et al, 2007)

Se ha comprobado que la aparición de fatiga neuromuscular se debe a la disminución del impulso neural y la activación muscular así como también la presencia de daño de las fibras musculares reflejado en el aumento de la enzima fosfocreatinkinasa (CPK) en sangre. La CPK MM es la enzima característica del músculo estriado, CPK MB en el músculo cardiaco y CPK BB en el cerebro. (Brancaccio, 2010, Baird MF, et al., 2012)

La evaluación y medición de la fatiga neuromuscular puede realizarse por medio de herramientas tecnológicas usando una plataforma de fuerza conectada a un computador, el cual posee un software informático que registra las variables del desempeño del salto contra movimiento (CMJ). (Gathercole, 2015)

De acuerdo con lo expuesto, este proyecto tiene como objetivo identificar la correlación entre las variables del salto contra movimiento y el marcador

bioquímico de fosfocreatinquinasa (CPK) para establecer el estado de fatiga neuromuscular de los deportistas de fondo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Definición del problema

La fatiga muscular inducida por el ejercicio es un tema de investigación que se destaca dentro del ámbito deportivo ya que puede ser causada por diversos factores internos o externos al individuo. Una de las diversas definiciones de fatiga establece “una pérdida reversible de la fuerza muscular (contracción muscular) durante el trabajo sobre el tiempo (fatiga muscular periférica durante el ejercicio)” (Rainoldi, 2008).

En el deporte de competición existe una influencia importante con relación a la fatiga neuromuscular, ya que concurren diversos mecanismos responsables de su producción, destacando los movimientos y exigencias que deben ejecutar los deportistas tales como saltos, cambios de dirección y variaciones de velocidad en aceleración y desaceleración.

Adicional a lo anterior, la evidencia científica también enfatiza sobre otros aspectos de fatiga neuromuscular tales como: la alteración de la magnitud y de los tiempos de activación muscular, la alteración de la capacidad de coactivación del músculo, la disminución del control de la extremidad inferior predominante en el plano frontal, los desequilibrios neuromusculares entre pierna dominante y no dominante, la inadecuada rigidez músculo esquelética, los déficits en el control postural, la disminución de la propiocepción, los déficits de fuerza central del cuerpo y sus mecanismos de anticipación. (Vanmeerhaeghe, 2013)

Según (Dal Monte, 2002) “Existen varias pruebas que parecen ser adecuadas particularmente para la valoración funcional en actividades. Para los fines de la evaluación, la clave en una prueba de investigación está entre la fuerza explosiva y el resultado de 10 a 15 segundos de resistencia en fuerza explosiva”

Con el propósito de evaluar la musculatura de los miembros inferiores, las pruebas de salto se pueden llevar a cabo utilizando como sistema de medición la plataforma de fuerza. De esta manera surge la importancia de evaluar la función neuromuscular en el deporte de resistencia en atletas ya que “se demuestra que la fatiga se establece hacia el final de una competencia, causada por bajas concentraciones de glucógeno en un número considerable de las fibras musculares individuales, en un ambiente cálido y húmedo, la deshidratación y la función cerebral reducida también pueden contribuir al deterioro en el rendimiento (Mohr, 2005). En conclusión, la fatiga o el rendimiento deteriorado en el deporte de resistencia se produce durante diversas fases en un juego, y diferentes mecanismos fisiológicos parecen operar en diferentes circunstancias de un juego.” (Mohr, 2005).

En relación con la evaluación de la fatiga y el daño muscular (Byrne, 2004) y (Warren, 1999) sugieren que “las medidas de la función neuromuscular proporcionan los medios más eficaces para evaluar la magnitud del daño músculo esquelético resultante de la acción excéntrica. Impedimentos funcionales como por ejemplo reducciones en la resistencia y la potencia son inmediatos, prolongados, y tal vez el síntoma más importante de microlesión al considerar el rendimiento atlético en presencia de daño muscular”

Existen actividades de requerimiento en los diferentes deportes tales como el salto, la agilidad, la explosividad y la resistencia de larga duración (Damasceno, et al., 2015), que pueden originar una actividad muscular exigente dependiendo de la intensidad de trabajo. Por lo anterior la exigencia puede resultar nociva hacia una alteración en la unidad motora generando una disminución sobre el rendimiento del deportista, como resultado de la inflamación en respuesta al daño muscular.

El músculo dañado reducirá la tolerancia a fuerzas de impacto durante un movimiento. Dentro del ciclo acortamiento estiramiento en el salto, existe una mayor probabilidad sobre el tiempo de contacto durante la rotura y fases de empuje debido a la fuerza disminuida, la actividad refleja y la rigidez inicial. El

trabajo se incrementará durante la fase de arranque que resulta en la disminución de la eficiencia y el potencial de la fatiga acelerada durante las acciones de acortamiento y estiramiento repetidas lo que ocasionará síntomas de perturbación neuromuscular inducido por el ejercicio que podrían persistir durante al menos 10 días. (Deschenes et al, 2000).

El interés de esta investigación justifica y plantea la importancia del tema a tratar, tomando como referencia los procesos de valoración neuromuscular sobre deportistas de resistencia, que surgen a partir de las investigaciones destacadas por (Komi, 1977) el cual refiere sobre la “reducción en la eficiencia neuromuscular de los extensores de la rodilla después del ejercicio excéntrico. Esto se refleja como una disminución en la fuerza electromiográfica integrada (iEMG) y la frecuencia de activación, resultan en una posible mayor actividad central (estimulación nerviosa) requerida para el logro de una fuerza submáxima o máxima.

Según el autor (Deschenes et al, 2000) el aumento de fuerza electromiográfica integrada (iEMG) se localiza en el recto femoral, donde se centra el dolor. Además, el deterioro de la eficiencia neuromuscular fue demostrado más que otros síntomas de daños como la pérdida de fuerza, dolor muscular y el aumento de los niveles de proteínas circulantes en las miofibrillas.

1.2. Pregunta

¿Cuál es la asociación existente entre las variables del desempeño en el salto contra movimiento con los niveles de CPK, y cuales identifican la función neuromuscular (FNM) en deportistas de resistencia?

1.3. Delimitación del problema

El presente estudio se realizó con deportistas de resistencia (Atletismo de fondo), de sexo masculino, con edades comprendidas entre 19 a 35 años. A esta población se le practicó un protocolo fatigante. Posteriormente se registró y analizó cada una de las variables del salto contra movimiento junto con la variable bioquímica de fosfo creatin quinasa (CPK.)

El tema está circunscrito únicamente, a la relación de las variables del salto contra movimiento y la variable bioquímica (CPK) para monitorizar la fatiga neuromuscular periférica en deportistas de resistencia.

Los deportistas son individuos altamente seleccionados de una población por su desempeño, por lo tanto no representan el comportamiento poblacional de una variable y su muestra es por definición no probabilística, acercándose al valor total de deportistas de resistencia en las modalidades escogidas.

1.4. Hipótesis Nula

No existen diferencias entre los valores pre y pos fatiga de las variables del desempeño del salto contra movimiento y no se correlacionan con la CPK.

1.5. Hipótesis alterna

Existen diferencias entre los valores pre y pos fatiga de las variables del desempeño del salto contra movimiento y se correlacionan con la CPK.

2. Justificación

Para los objetivos propuestos en este trabajo, en primer lugar es necesario señalar que la fatiga neuromuscular “aparece durante una competición que posee una o más condiciones orgánicas y funcionales de agotamiento. El concepto puede ser definido como: “la incapacidad para mantener la fuerza o potencia requerida durante el esfuerzo. Se determina esencialmente por un fallo en la capacidad contráctil del músculo” (Dal Monte, 2002, p.7) poner la página porque se trata de una cita textual). Así mismo, es importante tener en consideración que aquí se entenderá por fatiga periférica la reducción de la fuerza producida a nivel distal desde la unión neuromuscular. (Gandevia, 2001). Ambos conceptos son indispensables para la demostración de las hipótesis propuestas en este trabajo.

Este proyecto se propone determinar la correlación de las variables del salto contra movimiento en deportistas de fondo, con el objetivo de cuantificar el grado de fatiga neuromuscular. Dicha fatiga se relaciona con el nivel de desempeño físico. En ese sentido, es necesario tener en cuenta un punto de clasificación de fatiga y su relación con la variable bioquímica de fosfocreatina quinasa (CPK), las cuales influirán en el rendimiento integral del individuo.

Es importante indicar que este trabajo tiene como punto de partida una tesis de maestría titulada “Efecto de la neuroestimulación vascular sobre el músculo liso en la recuperación post ejercicio en atletas”, presentada en la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, elaborada por Ospina en 2015. En ésta se evaluó la “efectividad de la aplicación de la neuroestimulación vascular Bodyflow® sobre el músculo liso en la fatiga en el corto plazo (2 horas) en atletas de resistencia hombres, después de la realización de un ejercicio fatigante, mediante indicadores de rendimiento, bioquímicos y psicológicos”.

En ese orden de ideas, en este trabajo se plantea como objetivo principal la identificación de las variables más relevantes de fatiga neuromuscular aguda a

través del análisis de desempeño del salto contra movimiento y su correlación con pruebas bioquímicas en deportistas de resistencia con el fin de generar una herramienta diagnóstica útil dentro del deporte de rendimiento que también dé aportes significativos en el grupo de trabajo interdisciplinario.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar las variables directas de fatiga neuromuscular aguda y su relación con la prueba bioquímica (CPK) pre y pos entrenamiento a través del análisis de desempeño del salto contra movimiento en deportistas de resistencia.

3.2. Objetivos específicos

Definir las variables de fatiga neuromuscular aguda a través del análisis de desempeño del salto contra movimiento en deportistas de resistencia de alto rendimiento.

Registrar las variables que mejor identifiquen las características de la fatiga neuromuscular aguda que se presentan antes y después dentro del protocolo de salto contra movimiento.

Correlacionar las características de fatiga neuromuscular aguda en relación con los niveles de CPK del estudio.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Fatiga muscular

La fatiga muscular se define como la inhabilidad de mantener los requerimientos de potencia, dependiendo de la declinación tanto de la fuerza como de la velocidad (Edwards, 1983). (Farrell, et al. 2012). La fatiga se distingue de la debilidad o el daño muscular donde la capacidad de recuperación se encuentra alterada. De otro modo los parámetros de desempeño tales como la fuerza, la velocidad y potencia se definen dentro de la ejecución de movimiento de toda actividad física o ejercicio. (Fitts, 1994)

La etiología de la fatiga muscular es multifactorial influenciada por diversos aspectos tales como la edad, la condición física, la composición muscular, el tipo de fibra, intensidad, duración y características del ejercicio. Los factores causantes de fatiga durante el ejercicio prolongado difieren de los factores generados en una actividad contráctil de alta intensidad ya que la fatiga que ocurre tempranamente se presenta si la actividad o tarea de fuerza es mantenida. (Farrell, et al. 2012).

La fatiga muscular podría resultar perjudicial desde las alteraciones propias del músculo (fatiga periférica) y/o cambios desde el sistema nervioso (fatiga central). A partir de lo anterior surgen varios sitios de fatiga (Bigland, 1984):

- Eferencia desde centros motores superiores
- Unidad excitatoria hacia motoneuronas inferiores
- Excitabilidad de la motoneurona
- Transmisión neuromuscular
- Excitabilidad del sarcolema
- Unidad excitación y contracción
- Mecanismos contráctiles
- Suministro de energía metabólica y acumulación de metabolitos

La fatiga neuromuscular en tareas de alta intensidad se presenta como una mayor pérdida en términos de fuerza, velocidad, y potencia. Por lo tanto es importante identificar el tipo de fibra muscular y los tipos de contracción (isométrica e isotónica) que se asocian con la fatiga, señalando que las unidades motoras oxidativas lentas tipo I son más resistentes a la fatiga que las unidades motoras glucolíticas rápidas tipo II. Las fibras de tipo IIa muestran una resistencia intermedia a la fatiga y las de tipo IIb una gran fatigabilidad. (Farrell, et al. 2012).

A nivel molecular la fatiga está relacionada con los componentes de interacción entre la actina y la miosina donde se presentan enlaces de puentes cruzados junto al fosfato inorgánico, los cuales generan la acción mecánica muscular. Se cree que la tasa de transición para limitar la tasa pico del desarrollo de la fuerza, con relación al cambio de la velocidad de acortamiento máximo muscular sin carga, está altamente correlacionada con una limitada tasa de hidrólisis del ATP, que a su vez también puede estar limitada por la etapa de disociación del difosfato de adenosina (ADP). Este esquema cinético ha demostrado ser útil en la evaluación de los mecanismos celulares de la fatiga muscular sobre los factores que actúan en los puentes cruzados. (Farrell, et al. 2012).

4.2. Causas de fatiga muscular

Dependiendo de las características propias de la acción de inervación y efecto motor se definen acciones de producción de fuerza con relación a la fatiga muscular. Las neuronas alfa motoras cumplen con la función de generar fuerza a través de la unión neuromuscular (fibra nerviosa y fibra muscular) conocida también como unidad motora (Liddell, Sherrington, 1925).

La unión de fibras nerviosas en grupos motores sobre los centros ventrales de la médula espinal para la inervación muscular proximal y axial, así como los grupos motores sobre los centros dorsales y laterales de la medula espinal para la inervación de la musculatura dorsal, influyen en el control regular de la

contracción muscular que se ejecuta por medio de la sinapsis entre el nervio y el músculo esquelético llamada unión neuromuscular además del reclutamiento de unidades motoras agregadas.

4.3. Reclutamiento de unidades motoras

En general el reclutamiento de unidades motoras sigue el orden del calibre (Henneman, 1965). Henneman (1957) demostró que las motoneuronas se reclutaban siguiendo un orden de tamaño creciente (principio del tamaño). Primero se activan las unidades motoras más pequeñas (requieren menos estímulo para su activación), luego las intermedias y, finalmente, las más grandes. Es decir se va ajustando el número de unidades motoras a la cantidad de fuerza que se ha de producir de forma progresiva. Dependiendo de la velocidad del esfuerzo, las grandes pueden activarse primero, ya que son de contracción rápida. (Merí, 2005)

Además, no se usan las mismas unidades motoras durante un esfuerzo continuado si no que se van relevando para no llegar al agotamiento. Esto se consigue manteniendo un número de unidades motoras activas necesarias para realizar el trabajo, mientras que las otras permanecen inactivas. Por otro lado, los deportes donde se deben generar gran fuerza duran poco, ya que usan gran cantidad de unidades motoras y las grandes se fatigan rápidamente, las unidades motoras de menor calibre no son capaces de mantener gran tensión. (Merí, 2005)

(Burke, 1981) Según el orden de reclutamiento de las unidades motoras pueden ser denominadas lentas, rojas o de tipo I y fibras musculares rápidas denominadas tipo II o blancas. De acuerdo con lo anterior la disminución en el momento de generar un potencial de acción o descarga de una neurona alfa motora desde el sistema nervioso central desde la parte medular anterior

ocasionaría una fatiga muscular como mecanismo protector de las fibras musculares con el fin de evitar un uso excesivo que pueda llevar a un estado de desequilibrio o lesión de la estructura.

Fibras Tipo I (Contracción lenta): Están inervadas por pequeñas neuronas del tipo motoneuronas α -2. La contracción es más prolongada que de las fibras blancas músculos posturales. (Merí A, 2005)

Existe también la posibilidad de generar una excesiva descarga neural donde la máxima utilización de la acetilcolina aumentaría la capacidad de recaptación o resíntesis del neurotransmisor generando una fatiga neuromuscular en el punto de sinapsis. Existe también la posibilidad de formar un potencial de acción a nivel neuromuscular, implicando iones como el potasio (K^+), sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y cloro (Cl^-), en donde la acumulación de iones de potasio (K^+) en el líquido extracelular puede inducir un imbalance hiperpolarizante de la membrana celular, causando un déficit de respuesta por parte de la fibra muscular. (Bennett, 2005).

La disminución del sustrato ATP almacenado o la deficiente producción y utilización del mismo, posee un efecto sobre la recuperación de la concentración del calcio en el citoplasma, el sodio y el potasio indispensables en la generación del potencial de acción y de reposo. La acumulación de iones calcio y sodio desencadenan un acopio de agua logrando una mayor unión entre actina y miosina, sin la presencia de ATP para su separación.

Otro componente destacado en la fatiga neuromuscular es el factor energético y glucolítico el cual juega un papel importante ya que su agotamiento puede causar cortos períodos de estimulación logrando deficientes tareas neuromusculares para su desempeño, así como también la influencia sobre la acumulación de radicales libres que afecta la homeostasis y el trabajo de la fibra muscular. (Bennett, 2005).

Se distinguen biomecánicamente tres elementos musculares aparte del sarcoplasma (líquido). El primero es el componente contráctil formado por los

filamentos, el segundo es el componente elástico en paralelo formado por el sarcolema y las fascias de envoltura, que tienen como función dar consistencia y evitar que los miofilamentos se separen; el tercero es el componente elástico en serie, formado por los tendones, la miosina (cuello y zona de inserción al tallo) y la titina. (Merí, 2005)

La fuerza total de un músculo depende de los componentes elásticos y contráctiles siendo los músculos con un porcentaje alto de fibras blancas los que aprovechan mejor la energía obtenida de la deformación elástica. (Figura 1) (Merí, 2005). Adicional a lo anterior existen factores que influyen en la fuerza de la contracción muscular como son el estado metabólico, el reclutamiento de unidades motoras, la longitud inicial de las fibras musculares, la cantidad de carga, la duración de las contracciones dependiendo de factores como la naturaleza del músculo, la temperatura del músculo, las condiciones bioquímicas locales, las hormonas tiroideas y la sumación de contracciones. (Chicharro, 2007)

Un músculo no puede producir movimiento hasta que no estén tensados los elementos elásticos. Por esta razón, para aumentar la velocidad y efectividad de la fuerza, el músculo ha de estar ligeramente pre estirado antes de contraerse (figura 1). Posteriormente, la tetanización fusionada impedirá que los elementos elásticos tengan tiempo para distenderse. (Merí, 2005)

4.4. Unidades motoras y tamaño del músculo

Se puede generar más fuerza cuando se activan más unidades motoras. Las unidades motoras tipo II generan más fuerza que las unidades motoras tipo I porque las primeras contienen más fibras musculares que las segundas. De manera similar, los músculos más grandes, como tienen más fibras musculares,

pueden producir más fuerza que los músculos más pequeños. (Kenney, et.al 2012)

Figura 1. Deformación elástica de las fibras musculares (pre estiramiento y acortamiento).

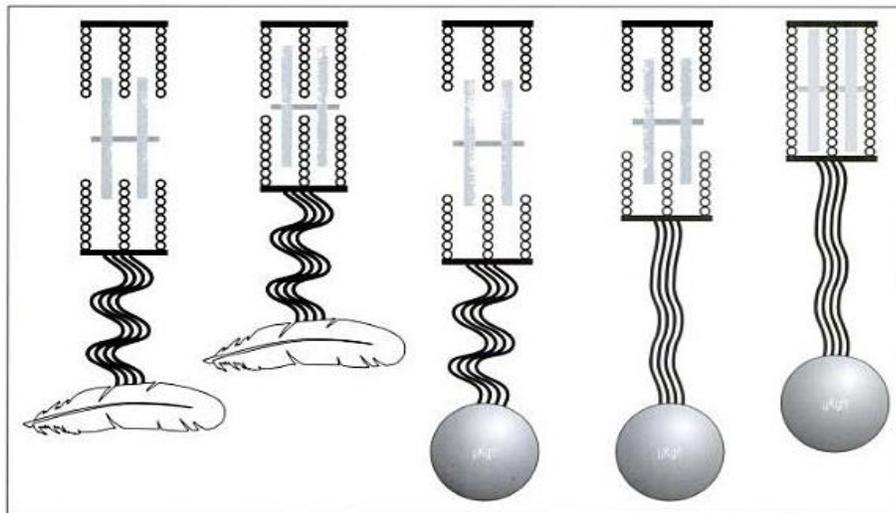


Imagen tomada del libro: Merí A. Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte. Editorial Médica Panamericana S.A. 2005.

5. TIPOS DE CONTRACCIÓN MUSCULAR

Al producirse movimiento de una articulación el músculo cambia de longitud y la inserción se mueve en relación al origen, contracción conocida como **isotónica**. La acción de acortamiento muscular se denomina contracción **concéntrica**, donde los filamentos finos son arrastrados hacia el centro del sarcómero. (Thibodeau GA, et, al 2012, p .149).

En ocasiones se aumenta la tensión dentro del músculo, pero sin que este cambie de longitud, en este caso el músculo se contrae y no produce movimiento. Cuando el músculo genera tensión y contracción pero su longitud permanece estática (invariable), esta acción recibe el nombre de contracción muscular estática o **isométrica**, ya que el ángulo de la articulación no cambia. (Wilmore, JH, et al., 2007, p.46)

La longitud del músculo es aproximadamente igual durante la contracción isométrica que durante la relajación. (Thibodeau GA, et, al 2012, p.149). En la contracción **excéntrica** los músculos pueden producir fuerza incluso cuando se alargan. (Wilmore, JH, et al., 2007, p.46)

5.1. Generación de fuerza

Cada vez que los músculos se contraen, ya sea una contracción concéntrica estática o excéntrica, debe graduarse la fuerza desarrollada para satisfacer las necesidades de la tarea o actividad. La cantidad de fuerza muscular desarrollada depende de la cantidad y del tipo de unidades motoras activadas, de la frecuencia de estimulación de cada unidad motora, del tamaño del músculo, de la longitud del sarcómero y de la fibra muscular, y de la velocidad de contracción del músculo. (Kenney, et.al 2012)

5.2. Frecuencia de estimulación de las unidades motoras.

Una sola unidad motora puede ejercer niveles variables de fuerza según la frecuencia de estimulación (figura 2). La menor respuesta contráctil de una fibra muscular o de una unidad motora a un único estímulo eléctrico se denomina contracción simple. Una serie de tres estímulos en una secuencia rápida, antes de la relajación completa del primer estímulo, puede derivar en un aumento aun mayor de fuerza o tensión. Este proceso recibe el nombre de sumación.

La estimulación continuada a frecuencias más altas puede conducir al estado de tétanos, lo que da como resultado la máxima fuerza o tensión de la fibra muscular o unidad motora. Frecuencia de disparo es el término utilizado para describir el proceso por el cual la tensión de una unidad motora dada puede variar desde el estado de contracción simple hasta el de contracción tetánica mediante el incremento de la frecuencia de estimulación de esta unidad motora. (Kenney, et.al 2012)

Figura 2. Sumación de frecuencia y tetanización.

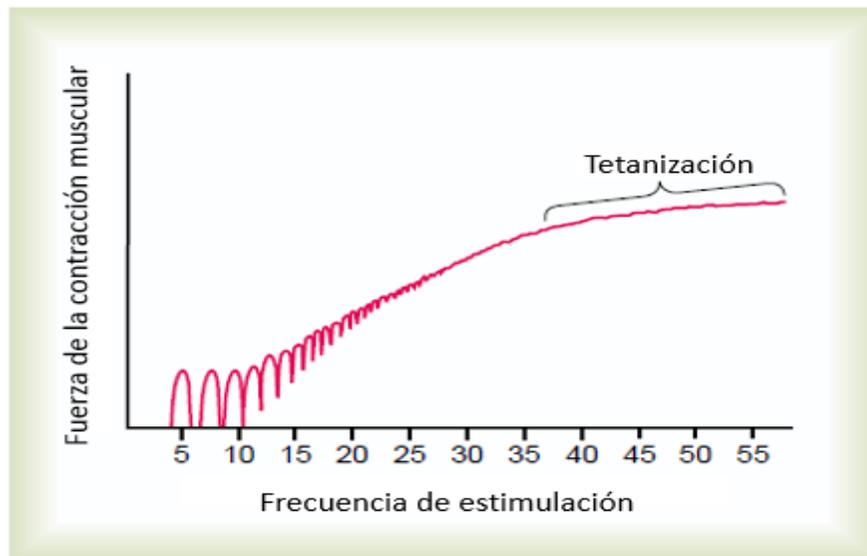
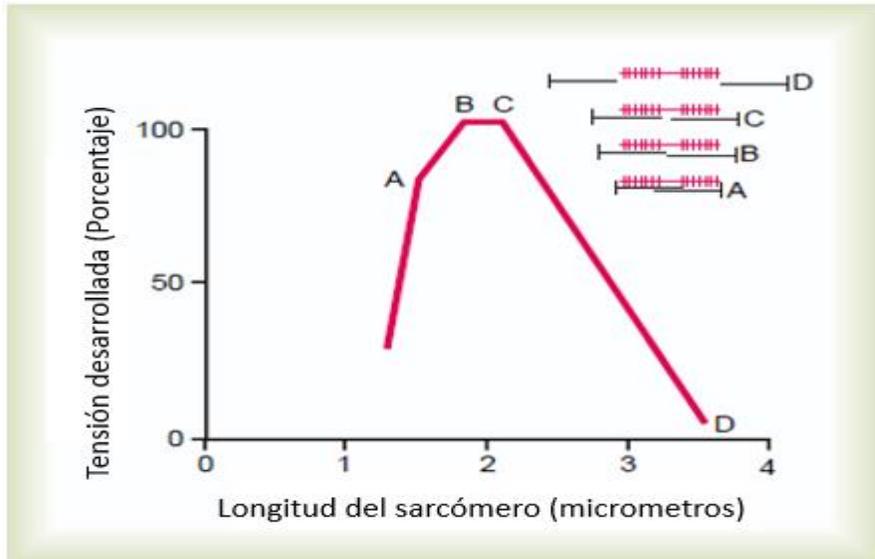


Imagen tomada de Guyton y Hall. (2011). Tratado de fisiología médica. Editorial Elsevier Saunders. 12 edición.

5.3. Longitud de las fibras musculares y los sarcómeros

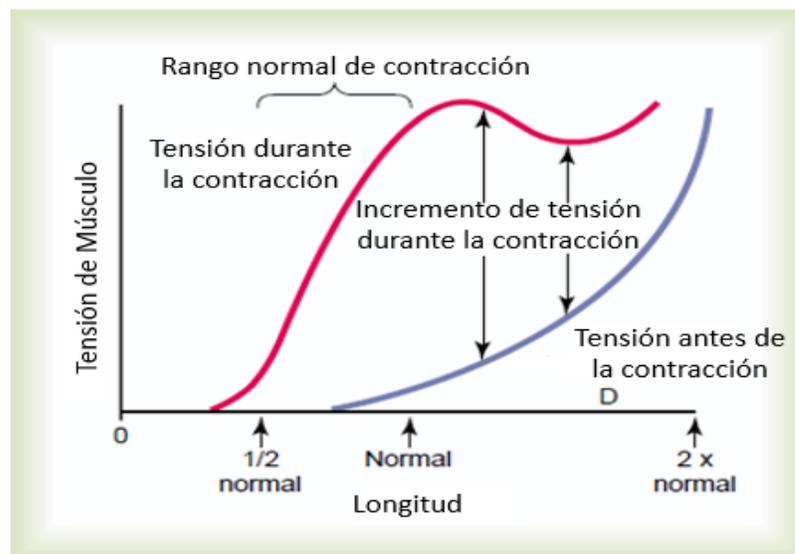
Cada fibra muscular tiene una longitud óptima respecto de su capacidad para generar fuerza (Figura 3 y 4). La longitud óptima de los sarcómeros se define como la longitud en la que se produce un solapamiento óptimo de los filamentos gruesos y los delgados. Así, se maximiza la interacción de los puentes cruzados de actina y miosina.

Figura 3. Longitud de sarcómero en relación con la tensión desarrollada en porcentaje.



Tomado de Guyton y Hall. (2011). Tratado de fisiología médica. Editorial Elsevier Saunders. 12 edición.

Figura 4. Relación de la longitud muscular y tensión antes y durante la contracción muscular.



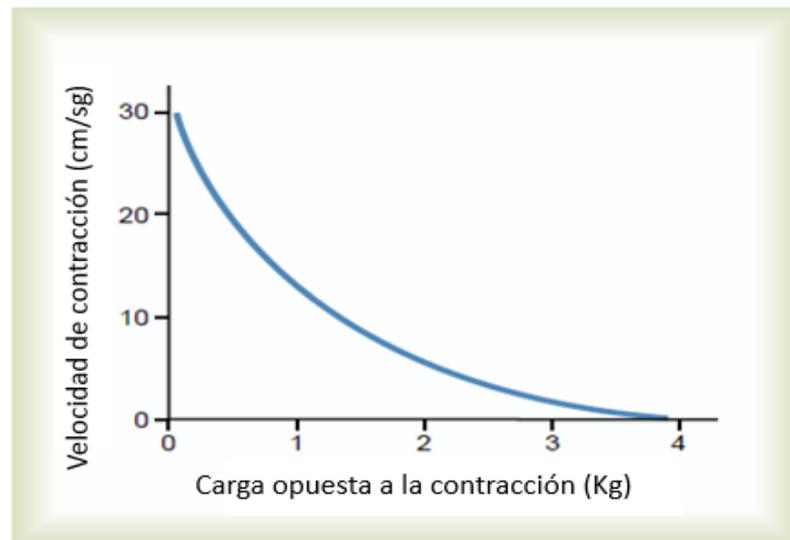
Tomado de Guyton y Hall. (2011). Tratado de fisiología médica. Editorial Elsevier Saunders. 12 edición.

5.4 Velocidad de contracción

La capacidad para generar fuerza también depende de la velocidad de contracción muscular (Figura 5). Durante las contracciones concéntricas (acortamiento), el desarrollo de la fuerza máxima disminuye progresivamente a velocidades más altas. Durante las contracciones excéntricas (alargamiento), se permite la máxima aplicación de la fuerza. (Kenney, et.al 2012)

Los músculos pueden ejercer fuerza incluso mientras se alargan. Este movimiento representa una contracción excéntrica, puesto que se produce un movimiento articular, en donde también se trata de una contracción dinámica debido al desempeño de las motoneuronas alfa. En este caso los filamentos delgados son arrastrados lejos del centro del sarcómero. Las fibras musculares se estiran al máximo de su longitud al igual que se produce un ligero acortamiento en los extremos del músculo y una elongación en el centro cuando se realiza un estiramiento. (Kenney, et.al 2012)

Figura 5. Relación de la carga y la velocidad de contracción del músculo esquelético.



Tomado de Guyton y Hall. (2011). Tratado de fisiología médica. Editorial Elsevier Saunders. 12 edición.

6. METABOLISMO FUNCIONAL MUSCULAR

Las características estructurales y funcionales del músculo dependen del metabolismo, velocidad de hidrólisis de ATP y la capacidad de conducción del calcio (Ca^{2+}). Las fibras tipo I poseen un desempeño disminuido en su actividad enzimática de mATPasa, reduciendo su demanda energética.

La demanda energética relacionada con la baja capacidad del manejo de Ca^{2+} , genera fibras de alta resistencia con un desarrollo de tensión lenta pero muy resistentes a la fatiga. De otro modo las fibras de baja resistencia y rápido desarrollo de tensión no serán tan resistentes a la fatiga, debido a su baja capacidad oxidativa y altos índices de ATPasas y manejo del Ca^{2+} .

Las fibras musculares tienen diversas características funcionales tanto a nivel molecular y metabólico, lo que hace característico a cada fibra dependiendo del tipo de proteína o tipo de miosina localizadas según la clasificación. Las fibras tipo I son las que más despacio hidrolizan el ATP para contraerse. (contracción lenta) y las tipo II (A, B, X) poseen mayor capacidad glucolítica y velocidad de contracción rápida. (Chicharro, et al; 2006, p. 92,94)

La forma de la proteína en este caso la miosina determina los tipos y subtipos de fibras musculares resaltando las características de almacenamiento de calcio intracelular, velocidad de contracción, metabolismo, almacenamiento de calcio.

En la gráfica 6 se destacan aspectos característicos de las diferentes fibras musculares:

6.1. Fibras Tipo I

(Contracción lenta): fibras pequeñas con gran cantidad de sarcoplasma con predominio en su coloración roja debido al mayor contenido de mioglobina y capilares pero con menor cantidad de miofibrillas, fácilmente estimulables y

actúan cuando la fuerza a realizar es poca. Son altamente resistentes al esfuerzo poco intenso, encontrándose en mayor porcentaje en los músculos posturales (fibras de resistencia) (Merí A, 2005).

Poseen un metabolismo característico de oxidación debido a su amplio contenido mitocondrial, gran cantidad de capilares sanguíneos y elevadas concentraciones de mioglobina que les permiten captar gran cantidad de oxígeno sanguíneo. (Chicharro et, al; 2007, p.93). Su inervación está dada por motoneuronas que producen contracciones lentas y de amplitud reducida, siendo muy resistentes a la fatiga, por lo que permiten realizar esfuerzos de larga duración. “La velocidad de propagación del impulso nervioso en el axón que inerva a estas fibras es relativamente baja (60-70 m.s⁻¹ frente a los 80 – 98 en las neuronas que inervan a las fibras II m.s⁻¹)” (Chicharro et, al; 2007, p.93).

6.2. Fibras intermedias o tipo IIA

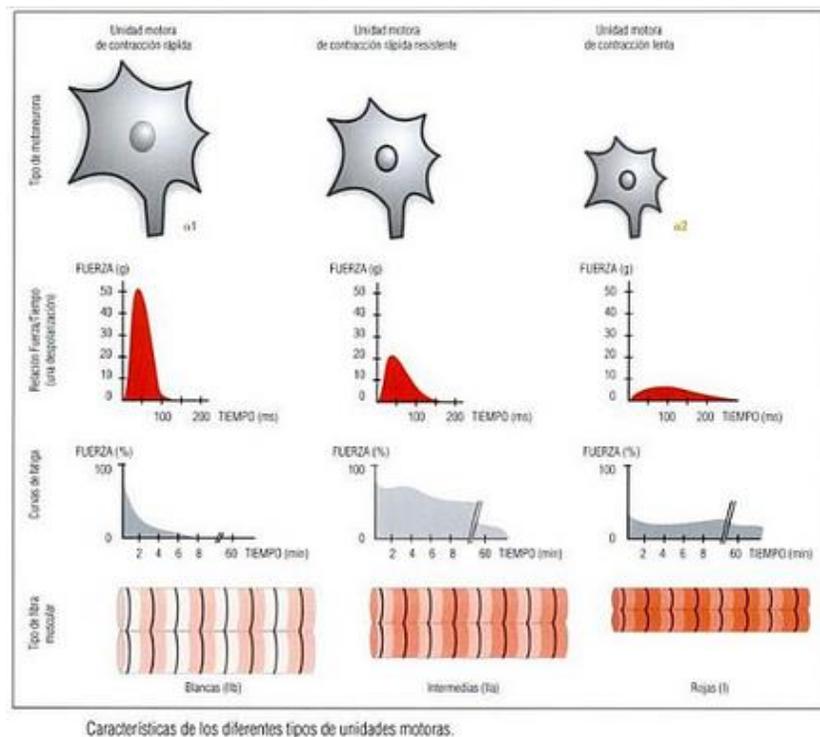
Tienen un tamaño y metabolismo intermedio y son capaces de resistir generando fuerzas considerables. Su diámetro es mayor que el de las fibras I y IIB siendo de mayor grosor incluso mayor que las de tipo I. Predomina un metabolismo más oxidativo que glucolítico. Desarrollan una tensión mucho menor comparadas con las fibras tipo IIb, pero son más resistentes a la fatiga. Poseen mayor capacidad glucolítica y menor oxidativa. La contracción es reducida en términos de tiempo alcanzando una fatiga de forma rápida lo que origina contracciones rápidas y de amplitud elevada, particular de los ejercicios breves e intensos. (Chicharro et, al; 2006, p.94)

6.3. Fibras blancas, rápidas IIb

Estas fibras tienen número relativamente escaso de mitocondrias, un metabolismo aeróbico bajo y una menor resistencia a la fatiga que las fibras de contracción lenta. De mayor tamaño e inervadas por motoneuronas tipo a-1 y de gran calibre, que solo se activan cuando hay que realizar una fuerza considerable, respondiendo con una contracción del tipo “Todo o nada” (se

contrae toda la fibra o no se contrae). Las mitocondrias son escasas y pequeñas, ya que el metabolismo de este tipo de fibras es principalmente glucolítico. (González B, et.al 2002), (Billat V, 2002, p.52)

Figura 6. Características de los diferentes tipos de unidades motoras.



Tomado del libro: Merí A. Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte. Editorial Médica Panamericana S.A. 2005.

Las fibras musculares fásicas (Tipo IIA y B) de rápida velocidad de desarrollo, tensión y relajación son altamente fatigables (Burke, 1974), por lo tanto el interés de su estudio se enfatiza en la capacidad contráctil muscular evaluándose de acuerdo no solo a la producción de fuerza sino también al tiempo de contracción y

relajación. Contrario a lo anterior la fuerza de las fibras musculares tónicas es reducida, inversa a la fuerza aumentada y a los tiempos de contracción y relajación muscular. Los músculos de fibra tipo I tónicos desarrollan menor fuerza debido a una tetanización a menores frecuencias (Bienfait, 2001), (Gonzalez B, et.al 2002).

7. MODELOS FISIOLÓGICOS DE FATIGA Y EJERCICIO

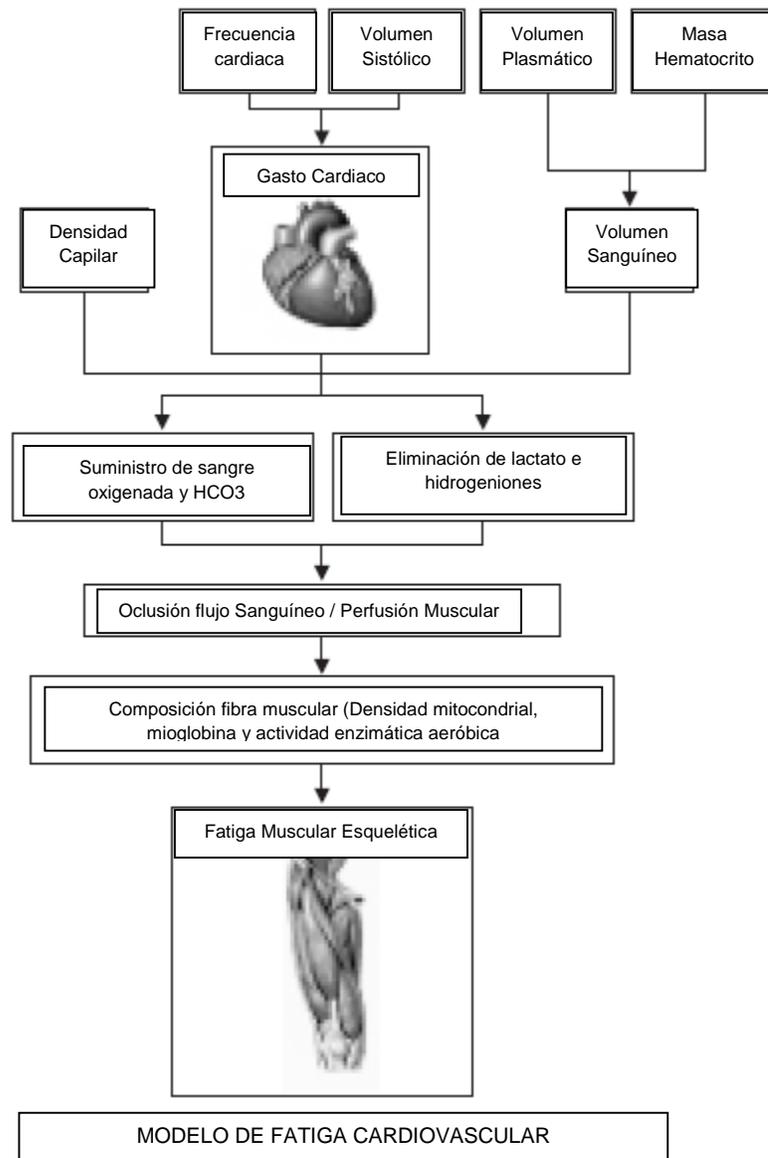
Según (Noakes, 2000) un concepto popular en las ciencias del ejercicio sostiene que la fatiga desarrollada durante el ejercicio de intensidad moderada a alta, se involucran dentro de cuatro modelos adicionales que deben ser considerados cuando se evalúan los factores limitantes, ya sea de corta duración, ejercicio prolongado máximo y submáximo.

Dichos modelos ofrecen una visión general desde el punto de vista metabólico, fisiológico y biomecánico que pueden limitar el desempeño en diferentes condiciones de ejercicio.

7.1. Modelo cardiovascular anaeróbico:

Cuando la capacidad del sistema cardiorrespiratorio no proporciona suficiente oxígeno a los músculos activos, debido a su demanda inducida por el 'metabolismo' 'glucolítico'. Pero este modelo cardiovascular anaeróbico es insatisfactorio debido a que un análisis más riguroso, indica que el primer órgano afectado por la intensidad durante el ejercicio máximo probablemente sería el corazón y no los músculos esqueléticos.

Figura 7. Modelo cardiovascular anaeróbico

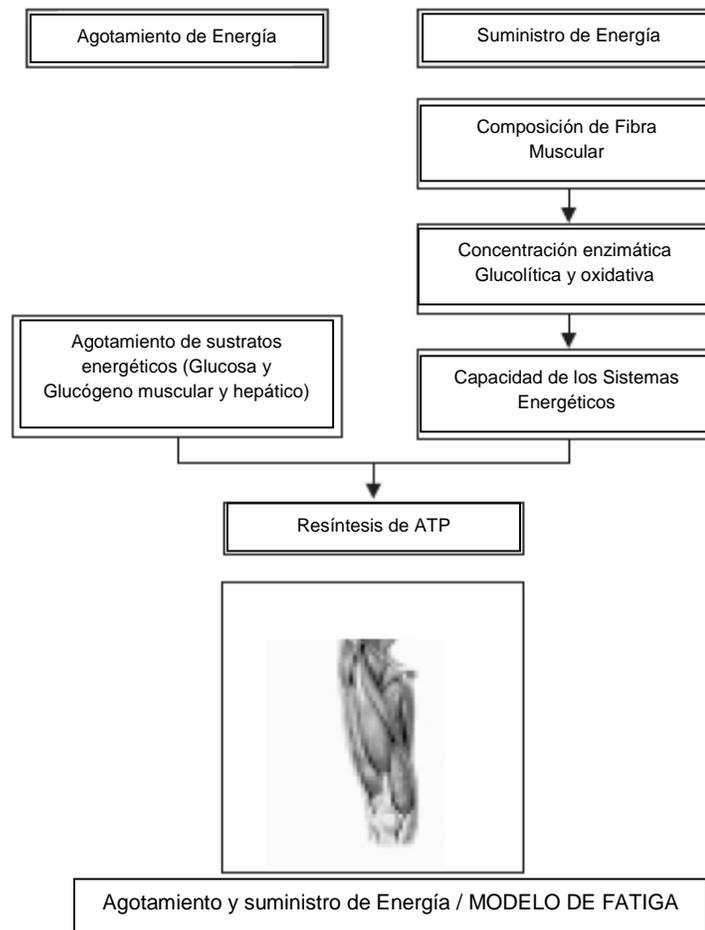


Tomado del artículo: Abbiss C, Laursen P. (2005). Models to Explain Fatigue during Prolonged Endurance Cycling. Sports Medicine. 35 (10): 865-898

7.2. Modelo de agotamiento y suministro de energía:

En el ejercicio máximo, este modelo sostiene que el rendimiento de resistencia está determinado por la capacidad del corazón para bombear grandes volúmenes de sangre y oxígeno a los músculos. Eso facilita a los músculos logrando tasas de trabajo más altas (aptitud cardiovascular) antes de que supera la oferta disponible de oxígeno ("anaerobiosis") (Noakes, 2000).

Se predice que el suministro de energía en el rendimiento en eventos de diferente duración, se determina por la capacidad para producir energía (ATP) por vías metabólicas separadas, que incluyen los fosfágenos, glucólisis independiente de oxígeno, glucólisis aeróbica y la lipólisis aeróbico. Un alto rendimiento se explica por una mayor capacidad de generar ATP en las vías metabólicas específicas asociadas a una actividad. El ejercicio debe cesar cuando se produce el agotamiento de ATP. (Noakes, 2000)

Figura 8. Modelo de fatiga.

Tomado del artículo: Abbiss C, Laursen P. (2005). Models to Explain Fatigue during Prolonged Endurance Cycling. Sports Medicine. 35 (10): 865-898

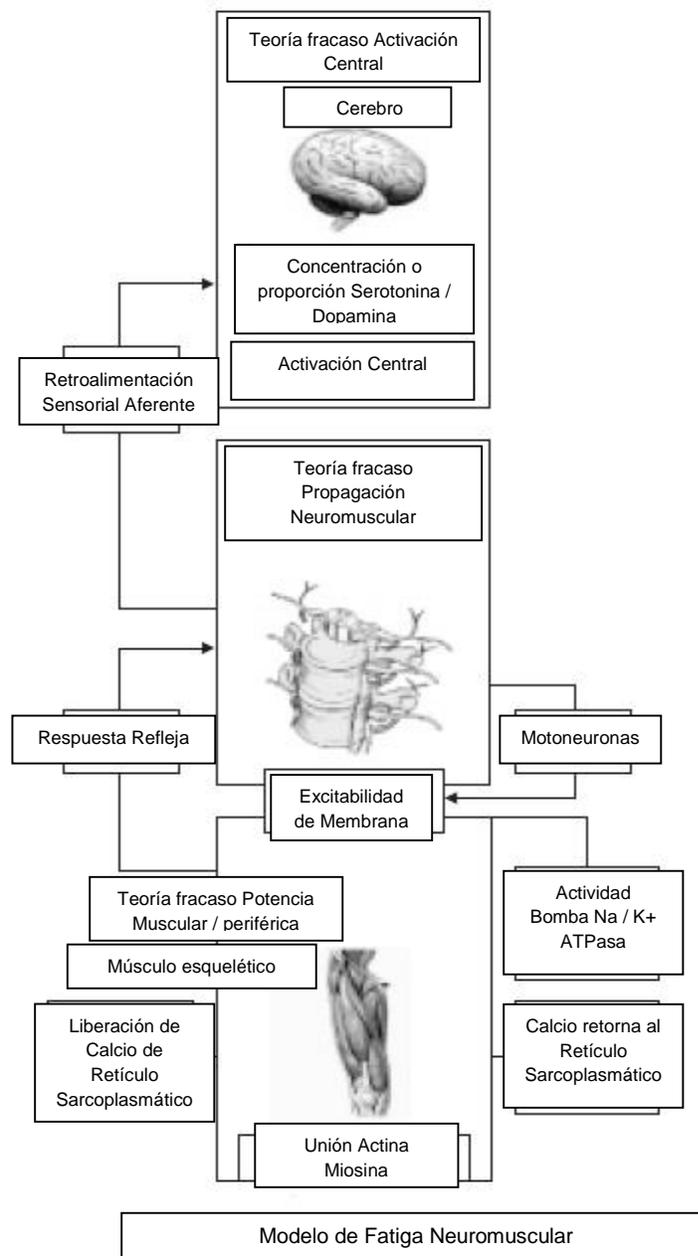
7.3. Modelo de reclutamiento muscular y potencia:

Este modelo tiene dos partes que implican que no es la tasa de suministro de sustrato (oxígeno o combustible) al músculo lo que limita el rendimiento, sino los procesos que intervienen en el reclutamiento, excitación y contracción del músculo esquelético.

Para el modelo de reclutamiento muscular, la evidencia es lo suficientemente convincente para creer que la fatiga del sistema nervioso central contribuye a la disminución del rendimiento en el ejercicio prolongado, la altura y el calor. Este modelo propone también una fatiga periférica progresiva para que el sistema nervioso central realice un ajuste apropiado en donde la aparición de la fatiga neuromuscular sucede dentro de una relación nerviosa central y periférica produciendo un fallo o disminución en el ciclo de mando central hacia los componentes proteicos de miosina y actina. (Abbiss et al 2005)

De esta manera la capacidad de producción de fuerza muscular se restringe por estímulo eléctrico en donde la variación en el potencial de acción podría manifestar una disminución en la excitabilidad de la membrana celular. Por otro lado se argumenta que una activación reducida del sistema nervioso central hacia los músculos ejercitados es un mecanismo de protección en donde la reducción del impulso de descarga busca preservar la concentración de ATP y sodio (Na^{++}) evitando daños excesivos en las fibras. (Abbiss et al 2005)

Figura 9. Modelo de fatiga neuromuscular.



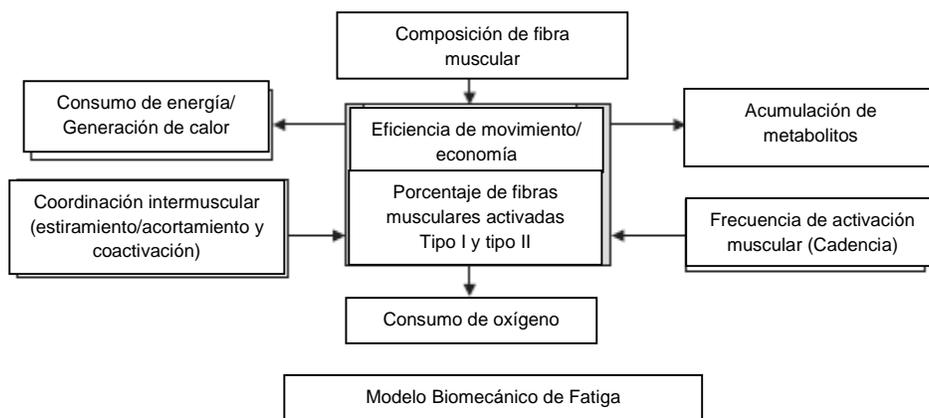
Tomado del artículo: Abbiss C, Laursen P. (2005). Models to Explain Fatigue during Prolonged Endurance Cycling. Sports Medicine. 35 (10): 865-898

7.4. Modelo biomecánico:

La predicción del rendimiento se basa en la gran capacidad muscular para actuar como un resorte. Una mejora en el rendimiento se deriva de un aumento en la eficiencia del músculo. La economía del movimiento en conjunto con un mejor desempeño de las habilidades motrices, genera componentes fisiológicos que retardan la aparición de la fatiga al disminuir la acumulación dilatada de metabolitos, el consumo de oxígeno, menor aprovechamiento de fuentes energéticas y disminución de la temperatura corporal.

Como en el caso de las acciones de alta velocidad, contracción muscular excéntrica y corta duración como correr, se induce una forma específica de fatiga que se mantiene en un tiempo considerable pos ejercicio, en donde se evidencia una reducción en la capacidad contráctil, la tolerancia al estiramiento y una transferencia muscular retardada en el acortamiento dentro del ciclo estiramiento - acortamiento.

Figura 10. Modelos biomecánico de fatiga.



Tomado del artículo: Abbiss C, Laursen P. (2005). Models to Explain Fatigue during Prolonged Endurance Cycling. *Sports Medicine*. 35 (10): 865-898

8. FATIGA NEUROMUSCULAR AGUDA EN EL DEPORTE

Dentro del campo deportivo, las exigencias de cada disciplina conllevan una serie de aspectos relacionados entre el rendimiento y la fatiga. Existen varios autores los cuales formulan diversas definiciones de fatiga determinando como una constante disminución temporal de la capacidad para realizar o ejecutar una acción física. Entre las diversas definiciones dependiendo de sus características se encuentran:

8.1. Rendimiento y función:

Intensa actividad muscular que provoca una disminución del rendimiento de los músculos cuando se utilizan cerca de su capacidad máxima. Los cambios en el rendimiento incluyen la reducción de la producción de fuerza, disminución de la velocidad de acortamiento y lenta relajación; en donde la combinación de estos factores puede conducir a profundas disminuciones en el rendimiento sobre todo para los movimientos repetidos rápidamente. (Allen y Westerblad, 2001).

8.2. Metabólico:

Según (Izquierdo, 2008) las limitaciones en el aporte energético o la acumulación intramuscular de ciertos metabolitos como lactato, iones de hidrógeno, fósforo inorgánico, o adenosin monofosfato se han relacionado con alteraciones en el

acoplamiento en el proceso de excitación contracción muscular o en el aparato contráctil (Green, 1997).

8.3. Neurofisiológico:

La incapacidad de mantener un potencial de acción dependiendo de la capacidad de recapturar iones de potasio (K^+) hacia el interior de la célula y desprender iones de sodio (Na^+) con el fin de repolarizar la membrana sarcoplasmática y permitir el acceso de un nuevo impulso eléctrico, constituye un importante factor desencadenador de la fatiga periférica, resultante de las alteraciones de la homeostasis en el músculo esquelético (Ascensao, et. al 2003).

- Reducción en la liberación o síntesis de acetilcolina (AC), el neurotransmisor que enlaza el impulso nervioso desde el nervio motor con la membrana muscular.
- La colinesterasa, la enzima que degrada a la acetilcolina (AC) una vez que se ha transmitido el impulso, podría tornarse hiperactiva y evitar la concentración suficiente de acetilcolina para iniciar un potencial de acción.
- La actividad colinesterasa podría tornarse hipoactiva (inhibida) y permitir que la acetilcolina se acumule en exceso e inhiba la relajación.
- La membrana de la fibra muscular podría desarrollar un umbral más elevado para la estimulación por parte de neuronas motoras. (Kenney, et.al 2012, p. 133)

8.4. Iónico:

Retención de calcio en el retículo sarcoplasmático que podría disminuir la disponibilidad de calcio para la contracción muscular. (Kenney, et.al 2012, p. 133)

8.5. Fuente de energía:

Agotamiento de la fosfocreatina o del glucógeno que afectan la producción de ATP. (Kenney, et.al 2012). En ejercicios intensos de corta duración, los hidrogeniones generados por el ácido láctico conducen a fatiga debido a que disminuyen el Ph muscular lo cual dificulta los procesos celulares que producen energía y contracción muscular. (Kenney, et.al 2012, p. 133)

La composición de fibras musculares en el rendimiento deportivo varía. En biopsias de diferentes deportistas y sedentarios según Merí (2005), observaron diferencias significativas de tipo de fibras que tenía relación con la actividad física que practicaban. Los deportistas con mayor número de fibras blancas tienen más facilidad en deportes de velocidad, salto, halterofilia, lanzamientos etc. Por su lado, los deportistas con mayor número de fibras rojas tendrán eficiencia en deportes de resistencia como maratón, carreras largas, esquí de fondo, ciclismo de carretera.

9. VARIABLES BIOQUÍMICAS

9.1. Marcadores del estado funcional muscular: fosfocreatinquinasa (CPK)

El nivel sérico de las enzimas del músculo esquelético es un marcador del estado funcional del tejido muscular y es muy variable, tanto en condiciones patológicas como fisiológicas. Un aumento en estas enzimas puede representar un índice de necrosis celular y un daño tisular muscular agudo y crónico. Los cambios en los niveles séricos de músculos, enzimas e isoenzimas se encuentran también en sujetos normales y en los atletas después de un ejercicio extenuante. La cantidad de enzimas del tejido muscular en sangre puede ser influenciada por el ejercicio obteniendo cambios del nivel sérico de fosfocreatinquinasa (CPK) estando acordes a los diferentes protocolos según la intensidad y el nivel de entrenamiento. (Brancaccio, et al 2007)

El nivel de fosfocreatinquinasa (CPK) puede estar elevado debido al daño del tejido muscular ocasionado por el entrenamiento intenso y prolongado, el cual se ve reflejado a nivel metabólico y mecánico. Dicho mecanismo mecánico de daño muscular tisular local, es la degeneración sarcomérica debido a la fragmentación de las líneas Z lo que ocasiona la sensación de dolor.

El estudio de la creatin quinasa (CPK) permite obtener información sobre el estado del músculo. Los altos niveles de creatin quinasa (CPK) en suero en sujetos aparentemente sanos pueden estar correlacionados con el nivel de entrenamiento físico. Sin embargo, si estos niveles persisten en reposo, puede ser un signo de enfermedad muscular subclínica, debido a que las cargas de

entrenamiento pueden evidenciar la aparición de síntomas tales como una fatiga profunda. (Brancaccio, et al 2010, 2011)

(Brancaccio, Maffulli, Limongelli, 2007) definieron una mayor cantidad de actividad enzimática en suero post ejercicio en ejercicios competitivos de fondistas, maratonistas o triatletas. El momento de la segregación de (CPK) y el aclaramiento del plasma depende del nivel de formación, tipo, intensidad y duración del ejercicio. El punto más alto de los niveles de (CPK) en suero es de aproximadamente 2 veces por encima de la línea de base produciéndose en 8 horas después del entrenamiento de la fuerza.

Después de un ejercicio prolongado, la actividad total de (CPK) en suero está marcadamente elevada durante las 24 horas después de la sesión de ejercicio. Cuando los sujetos descansan, la (CPK) se mantiene elevada durante las 48 horas pos ejercicio en la primera semana después del ejercicio. La liberación de (CPK) después del ejercicio excéntrico alcanzó su punto máximo a las 96 horas después de una sesión. Una sesión adicional de ejercicio produce sólo pequeños aumentos probablemente de liberación enzimática acelerada. (Brancaccio, Maffulli, Limongelli, 2007)

Los niveles de fosfocreatinquinasa (CPK) disminuyen entre los días 4 y 10, probablemente debido a una adaptación al entrenamiento. El aumento de los niveles de creatin quinasa (CPK) después del ejercicio excéntrico se asocia con lesiones musculares, con un pronunciado aumento de entre 2 y 7 días después del ejercicio. Después de un ejercicio prolongado, la actividad total de (CPK) en suero está marcadamente elevada durante 24 horas después de la sesión de ejercicio. (Brancaccio, Maffulli, Limongelli, 2007)

Por lo anterior se destaca que la prueba de fosfocreatinquinasa (CPK) es una variable importante de estudio dentro del proceso investigativo ya que define el estado hematológico y bioquímico de la lesión muscular del deportista. De esta

manera los atletas de resistencia de larga duración serán evaluados dependiendo de su alteración significativa muscular en el acoplamiento contracción y excitación lo que conlleva a inducir la fatiga neuromuscular periférica en un período agudo.

10. FIBRAS MUSCULARES Y DEPORTE DE RESISTENCIA

En un individuo, los músculos poseen diferentes tipos de fibras que varían dependiendo de su proporción genética individual. De acuerdo a lo anterior se establece que los deportistas poseen altas demandas de exigencia muscular dependiendo de las necesidades propias de cada deporte, en donde el parámetro de intensidad se refleja en acciones rápidas, de corta duración y con un gran potencial en los requerimientos de fuerza (ej: sprinters, saltadores, halterófilos).

Debería presentarse un mayor porcentaje de fibras rápidas en los músculos que intervienen en el ejercicio, que en los deportistas que practican disciplinas poco intensas, de larga duración y que necesitan emplear poca fuerza. Los deportistas que presentan un mayor porcentaje de fibras rápidas se suelen caracterizar por producir más fuerza a cualquier velocidad de movimiento (lento o rápido) que los que presentan menor porcentaje de fibras rápidas. Es el caso de los velocistas en donde se ha demostrado que sus músculos de propulsión contienen más fibras de contracción rápida en hasta un 75% (Thortensson, 1977) y los corredores de fondo tienen más fibras de contracción lenta en hasta un 90%. (Costill, 1973) (Mirella, 2011)

Según (Bosco et, al 1979, 1983) la producción de fuerza durante el test de salto vertical en estudiantes de educación física realizada en un estudio, presenta distintos porcentajes de fibras rápidas en el músculo vasto externo del cuádriceps. Se observa que los sujetos con más del 60% de fibras II B en el vasto externo producen más fuerza en menos tiempo que los sujetos que tienen menos

del 40% de las fibras II A. Por lo tanto la producción de salto en los individuos se debe a un número mayor de fibras rápidas especulando una mayor producción de fatiga neuromuscular.

Según (García Verdugo, 2007) existen diversas causas que pueden llevar al deportista de resistencia a la fatiga neuromuscular:

- Exceso en las cargas de entrenamiento
- Error en la aplicación de las cargas
- Desajustes o errores de programación
- Errores en la organización de estructuras intermedias: mesociclos, microciclos, sesiones y ejercicios.
- Progresión excesiva al aumentar las cargas
- Exigencias técnicas excesivas que provocan la saturación del sistema nervioso.

En la resistencia la fatiga tiene un aspecto muy importante dentro del entrenamiento. Los fenómenos del cansancio delimitan el mantenimiento de una determinada fuerza o velocidad (García Verdugo, 2007). Zintl (1991) hace referencia al cansancio como una manifestación de la fatiga y lo define como la “disminución transitoria (reversible) de la capacidad de rendimiento”. La influencia de la fatiga en el deportista de resistencia dependerá de varios aspectos como la intensidad, la exigencia y el esfuerzo mantenido durante un período de tiempo. “La fatiga en relación con el tiempo estará influenciada por la continuidad de los estímulos y el tiempo de recuperación”. (García V, 2007)

Lo anterior fundamenta la investigación sobre la capacidad de rendimiento y proporción de las fibras musculares según su tipología dependiendo de las exigencias de cada deporte en conjunto con la evaluación de la fatiga neuromuscular a través de pruebas de salto, hacia la determinación de umbrales de extenuación en deportistas de resistencia.

10.1. MANIFESTACIONES DE LA FUERZA

Según la clasificación de la fuerza (Gonzalez et, al. 2002) se definen:

10.1.1. Fuerza absoluta:

Capacidad potencial teórica de fuerza dependiente de la constitución del musculo: sección transversal y tipo de fibra. Esta fuerza no se manifiesta de forma voluntaria, es decir, ni en entrenamiento ni en competición; solo en situaciones psicológicas extremas, con la ayuda de fármacos o por electro estimulación.

10.1.2. Fuerza isométrica máxima o fuerza estática máxima:

Máxima fuerza voluntaria que se aplica cuando la resistencia es insuperable. Se corresponde con el pico máximo de fuerza (PMF). (Gráfica 12)

10.1.3. Fuerza máxima excéntrica:

Se manifiesta cuando se opone la máxima capacidad de contracción muscular ante una resistencia que se desplaza en sentido opuesto al deseado por el sujeto. Este tipo de fuerza depende de la velocidad a la que se produce el estiramiento o la contracción excéntrica, por lo que siempre hay que indicar la velocidad o resistencia con la que ese hace el movimiento.

10.1.4. Fuerza dinámica máxima (FDM):

Expresión máxima de fuerza cuando la resistencia solo se puede desplazar una vez o se desplaza ligeramente y/o transcurre a muy baja velocidad en una fase de movimiento. (Figura 12)

10.1.5. Fuerza dinámica máxima relativa:

Máxima fuerza expresada ante resistencias inferiores a la necesidad para que se manifieste la (FDM), o la capacidad muscular para imprimir velocidad a una resistencia inferior a aquella con la que se manifiesta la (FDM).

10.1.6. Fuerza dinámica máxima relativa específica:

Fuerza útil o funcional: fuerza que aplica el deportista cuando realiza un gesto específico de competición.

10.1.7. Fuerza explosiva:

Resultado de la relación entre la fuerza producida (manifestada o aplicada) y el tiempo necesario para ello.

10.1.8. Fuerza explosiva máxima:

Máxima producción de fuerza por unidad de tiempo en toda la producción de fuerza, que supone la mejor relación fuerza - tiempo de toda la curva.

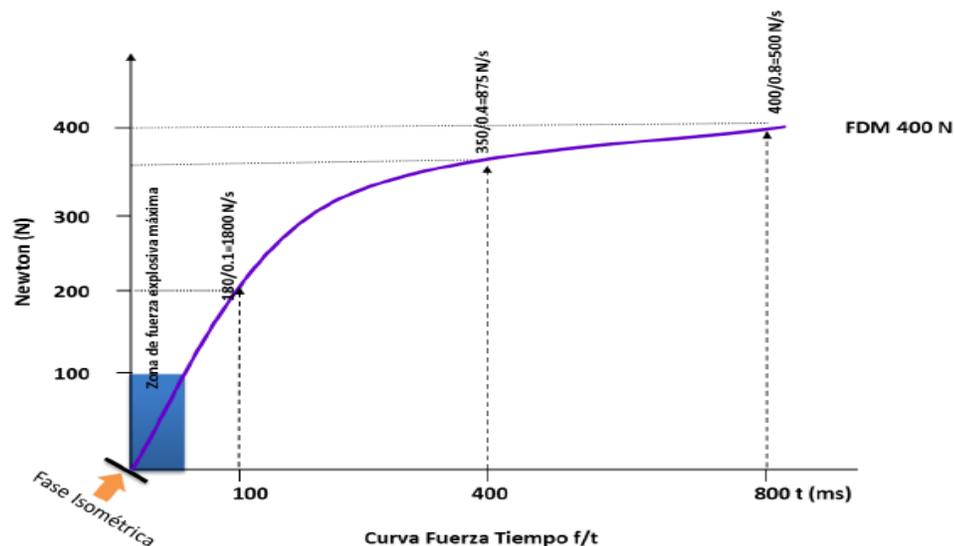
10.1.9. Fuerza elástico explosiva:

Se apoya en los mismos factores que la FE, uniendo a la misma el componente elástico, que actúa por efecto del estiramiento previo.

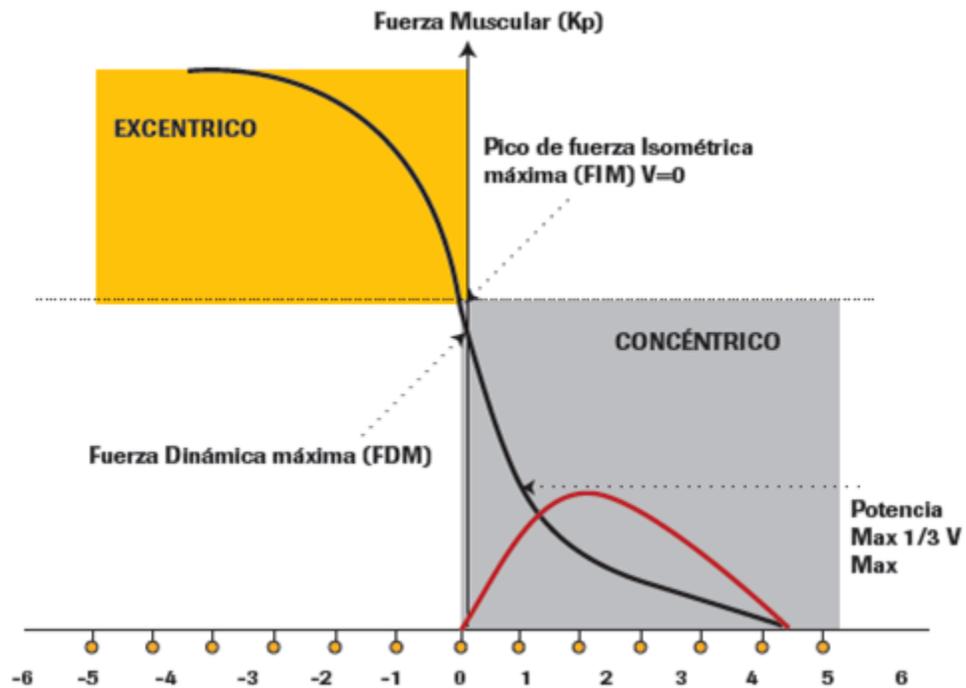
10.1.10. Fuerza elástico-explosivo-reactiva:

Añade a la anterior un componente de la facilitación neural, como el efecto reflejo miotático (de estiramiento), que intervienen debido al carácter del ciclo estiramiento acortamiento (CEA), mucho más rápido y con una fase de transición muy corta, por lo que el resultado dependerá en menor medida de los factores anteriores debido a la inclusión de este nuevo elemento.

Figura 11. Curva Fuerza /Tiempo (f/t).



Tomado del libro: Serrato M, et al., (2015). Lineamientos en ciencias del deporte. Medicina. Módulo 3: medición de la fuerza, potencia muscular. Departamento Administrativo del Deporte, la Recreación, la Actividad Física y el Aprovechamiento del Tiempo Libre. Coldeportes. Bogotá.

Figura 12. Tipos de contracción muscular

Tomado del libro: Serrato M, et al., (2015). Lineamientos en ciencias del deporte. Medicina. Módulo 3: medición de la fuerza, potencia muscular. Departamento Administrativo del Deporte, la Recreación, la Actividad Física y el Aprovechamiento del Tiempo Libre. Coldeportes. Bogotá.

11. SALTABILIDAD

Dentro de un gesto de salto, pliometría o ejercicios con ciclos de estiramiento acortamiento propuestos para lograr la conexión entre los entrenamientos de velocidad y fuerza, la pliometría utiliza el reflejo de estiramiento para facilitar el reclutamiento de unidades motoras. También almacena energía en los componentes elásticos y contráctiles del músculo durante la contracción excéntrica (estiramiento), que puede recuperarse durante la contracción concéntrica (Kenney et al, 2012).

Estas dos fases de contracción muscular se denominan dentro del ciclo de estiramiento - acortamiento (CEA) (Norman et al, 1979). En el momento del gesto deportivo los músculos realizan la secuencia del ciclo de estiramiento y acortamiento en donde se destaca a la fase concéntrica con mayor predominio de potencia seguido de una fase de contracción excéntrica.

En el gesto del salto se expresa la fuerza explosiva o también denominada fuerza - velocidad, fuerza rápida, fuerza veloz o potencia muscular. Este concepto se puede dividir en potencia máxima, que es el óptimo producto de fuerza y velocidad, y potencia específica, que es la potencia máxima que se manifiesta en el gesto de competición donde el sistema neuromuscular vence una resistencia a la mayor velocidad de contracción posible, por lo tanto la capacidad de un atleta de vencer resistencias externas al movimiento, lo realiza a una gran velocidad de contracción. (Rodríguez, 2008)

12. VALORACIÓN DE LA FATIGA

12.1. Salto contra movimiento (CMJ)

El salto contra movimiento (CMJ) permite evaluar la potencia de las piernas bajo el parámetro de dos ciclos lentos de estiramiento y acortamiento en condiciones de baja carga de estrés. A partir de una posición de pie y en posición vertical, el saltador realiza un movimiento flexionando las rodillas y las caderas, bajando su centro de masa. Inmediatamente después se extienden las caderas y las rodillas nuevamente para saltar verticalmente hacia arriba desde la superficie a través de un "movimiento de estirar acortar" (Quagliarella, et, al 2011)

Los deportistas del estudio (n=8) realizarán 3 saltos contra movimiento, con un descanso de 10 segundos entre salto. Las manos deben estar en la cintura durante toda la ejecución del salto y las piernas extendidas durante el primer contacto con el suelo para posteriormente flexionarlas y así amortiguar el impacto en la fase de aterrizaje (Bosco et al, 1979). Se utilizará una plataforma de fuerza de marca "Pasport" para medición de la fuerza de reacción vertical de los deportistas en conjunto con el software "force deck: neuromuscular performance technologies, versión 105197 Build 37401 PASCO a 1000Hz" el cual tomará los registros de las diferentes variables para su análisis.

Existen estudios que caracterizan los protocolos de evaluación de la fatiga neuromuscular de acuerdo a las diversas modalidades deportivas que se practican, a través de la prueba de salto contra movimiento. Este salto es un método usado comúnmente para tal fin, el cual diagnostica el rendimiento de cada individuo según la explosividad y potencia de los miembros inferiores. Esta prueba posee características de competitividad en varios deportes donde se

destacas factores tales como la velocidad, los cambios de ritmo y la saltabilidad como por ejemplo en el fútbol, el triatlón, las carreras de fondo entre otros (Boullosa D, et.al, 2011).

Teniendo relación entre la prueba de salto contra movimiento y el ciclo de estiramiento acortamiento al ejecutar la valoración de potencia y fatiga de miembros inferiores en deportistas, se hace indispensable contar con una plataforma de fuerza que recopile la información detallada de los saltos ejecutados a través de un software. (Mooney, et.al 2013).

De esta manera es posible identificar y obtener información de cada fase de ejecución del salto contra movimiento en donde se definen las variables como: promedio de fuerza concéntrica, promedio de fuerza excéntrica, promedio del índice de fuerza concéntrica desarrollada, pico de fuerza concéntrica, pico de velocidad concéntrica, pico de fuerza relativa concéntrica, tiempo de pico de fuerza concéntrica, tiempo de vuelo, altura de salto, pico de potencia y pico de potencia relativo, las cuales se busca relacionar de manera directa sobre la determinación de la fatiga neuromuscular del deportista (Cormarck, et.al 2013), (Cormie, et.al 2009).

12.2. Variables de saltabilidad y fatiga neuromuscular en plataforma

El salto es una condición compuesta por agilidad, velocidad y fuerza. De otro modo es una actividad física caracterizada por esfuerzos musculares cortos y explosivos de varios estilos, donde la exigencia muscular y la técnica adquieren una importancia esencial. La altura del salto está condicionada por la velocidad vertical en el momento del despegue y del ángulo con el que se proyecte el centro de gravedad. La velocidad vertical, por su parte, depende de la diferencia de altura del centro de gravedad entre el principio y final de la batida, y del tiempo en

que se tarda en recorrer esta distancia. Cuanto mayor sea la distancia y menor el tiempo, mayor será, en principio el componente vertical de la velocidad, aunque en cualquier caso se deberán tener en cuenta las características musculares de los sujetos (Molina et al., 1994)

La máxima potencia mecánica desarrollada por la musculatura es un elemento esencial en el rendimiento de muchos deportes. Los tests de salto vertical son frecuentemente utilizados para evaluar la potencia de la musculatura extensora de las extremidades inferiores. Más aún en deportes que impliquen saltos o cambios rápidos de posición. (Vandewalle, 1989)

Las medidas de la función neuromuscular, como la prueba de salto (contra movimiento / salto de potencia), el rendimiento de velocidad y la dinamometría isocinética e isoinercial se utilizan a menudo en el entorno deportivo colectivo. Estas evaluaciones se han hecho populares debido a la simplicidad de su uso y la mínima cantidad de fatiga adicional inducida. Existen variables comunes de medición en la prueba de salto que incluyen: potencia media, velocidad máxima, fuerza máxima, el salto de altura, el tiempo de vuelo, tiempo de contacto, y la tasa de desarrollo de la fuerza. Como requisitos de medición para las pruebas de salto se pueden incluir tapetes de contacto, plataformas de fuerza portátiles o no portátiles y encoders de rotación. (Halsón, 2014)

12.3. Altura del salto como medida de fatiga neuromuscular aguda

La disminución en la altura del salto observada después de las sesiones simuladas, reales de competencia o de formación en una variedad de ejercicios de combate y de la competencia real o simulada, sugieren que es un marcador válido de la fatiga aguda.

A nivel de post competencia se ve disminuido la capacidad de altura del salto dentro de la prueba de contra movimiento (CMJ) (Nedelec et al, 2013; Nedelec et al, 2014, Oliver et al, 2008). La mayor evidencia proviene de los deportes de carrera intermitente de alta intensidad (HIIS - High Intensity Intermittent Sprint Sport) (Twist, et al; 2005)

Existen evidencias de fatiga pos competencia reportados después de un entrenamiento de alta intensidad en entrenados (Ouergui et al., 2014), así como también existe una disminución del 5% del salto contra movimiento (CMJ) después de un juego de balonmano simulado. (Thorlund et al., 2008).

Estos datos se basan en investigaciones que permiten determinar el rendimiento en el salto como una medida de la fatiga dentro de un grupo específico de atletas y en algunos casos también para comparar su sensibilidad a la de otras medidas basadas en pruebas de laboratorio. La evaluación de la fatiga neuromuscular aguda a través del salto contra movimiento después de una sesión de entrenamiento o actividad competitiva realizada al inicio y posterior a la sesión de entrenamiento puede ser útil dentro del proceso de recuperación además de la utilidad hacia los entrenadores con el fin de evaluar la resistencia a la fuerza y la potencia del atleta mediante la evaluación de los cambios pre y pos ejercicio en los deportes fatigantes de actividad específica.

El entrenamiento deportivo requiere una valoración incluida en el proceso y que logra controlar si el entrenamiento está generando los estímulos esperados y, por tanto, debe estar constituida dentro de la planificación del entrenamiento. De este modo el objetivo de evaluar consiste en determinar variables que aprueben un mejoramiento en el proceso de entrenamiento y, con ello, el rendimiento deportivo. Es fundamental una recolección de datos sobre la condición físico deportiva a través de la evaluación por medio de test los cuales tengan un orden protocolario de cumplimiento objetivo y riguroso.

Es relevante destacar dentro de la valoración de la fuerza que se logre una medición dentro de movimientos dinámicos a través de acciones multiplanares y

multiarticulares dentro del entrenamiento, con pesas o sobrecargas, donde la velocidad del movimiento varía y la carga se mantiene constante a lo largo del recorrido. Esto es lo que se conoce como evaluación isoinercial de la fuerza. A diferencia de las evaluaciones de tipo isométrico o isocinético (cuya utilidad es relevante en el control de los procesos de rehabilitación y el seguimiento de lesiones o postoperatorios) que normalmente presentan una baja relación con el rendimiento neuromuscular, en acciones dinámicas (Baker et ál., 1994; Murphy et ál., 1994; Murphy & Wilson, 1996), la evaluación isoinercial de la fuerza muscular parece reflejar mejor los gestos y movimientos de entrenamiento y competición, propios de la mayoría de los deportes en los cuales se producen acciones repetidas de aceleración y desaceleración (Cronin et ál., 2003; Jidovtseff et ál., 2006, 2007; Murphy & Wilson., 1996). Se estudiará la valoración de la fuerza y la potencia para determinar rendimiento y para monitorizar la fatiga neuromuscular, procesos vitales en el entrenamiento moderno y determinantes de la efectividad de los métodos de entrenamiento. (Serrato, et al 2015)

Boullosa et al (2011) recomienda la evaluación del salto contra movimiento (CMJ) antes y después de un test de carrera incremental como medida útil de las adaptaciones musculares en los atletas de resistencia. También se encontraron que los cambios de rendimiento dentro del salto contra movimiento (CMJ) están correlacionados con el mejoramiento del rendimiento de la velocidad. Concerniente al riesgo de lesiones en condiciones de fatiga, la prueba de salto contra movimiento (CMJ) es un medio más seguro y aceptable para evaluar los cambios de resistencia a la fatiga como parte de los perfiles de rendimiento en los deportistas.

Adicional a lo anterior la evaluación y perfeccionamiento en la eficacia de las estrategias de recuperación post ejercicio en tenistas de élite se correlacionan con los cambios de altura en el salto contra movimiento (CMJ) hacia la investigación de nuevas intervenciones de recuperación pos entrenamiento

(inmersión en agua fría, prendas de compresión y las recomendaciones de sueño) (Duffield et al., 2014).

12.4. Ciclo estiramiento acortamiento (SSC)

La actividad muscular y tendinosa dentro de la ejecución de un salto combina tanto una contracción excéntrica consecuentemente con una contracción concéntrica, relacionando dicho proceso con la estimulación del reflejo miotático o de estiramiento.

Otro de los factores que influyen dentro de la relación del trabajo muscular o ciclo de estiramiento acortamiento (SSC) es la capacidad del almacenamiento energético excéntrico dentro del proceso elástico de la fibra muscular (estiramiento) la cual se utiliza posteriormente con una contracción concéntrica positiva. (González y Gorostiaga, 1995; 2002).

El trabajo mecánico de los músculos extensores de rodilla se centra en su extensión activa previo al almacenamiento de energía elástica de orden excéntrico. Posterior a lo anterior la energía almacenada se utiliza dentro del trabajo mecánico muscular concéntrico. (Komi, 1978)

12.5. Relación entre el tiempo de vuelo y el tiempo de contracción durante el salto contra movimiento (FT: CT)

La relación entre el tiempo desde el inicio del contra movimiento hasta que el deportista abandona la plataforma de fuerza. Esta relación del tiempo de vuelo y el tiempo de contracción (FT – CT) indica la capacidad de un atleta para utilizar el ciclo de estiramiento acortamiento. Un tiempo de contacto con el suelo ya es indicativo de un tiempo de contracción más corto o largo dentro de la relación (FT: CT) (Cormack et al, 2008)

Teniendo en cuenta una serie de diferentes variables CMJ, Cormack et al. (2008) reportaron que la proporción de tiempo de vuelo al tiempo de contracción (FT:

CT) durante un salto contra movimiento proporciona la información sobre la fatiga neuromuscular después de un partido de fútbol australiano. Como tal la disminución de la relación del tiempo de vuelo y tiempo de contracción depende en gran medida del aumento de la duración de la contracción.

Figura 13. Salto contra movimiento relación FT: CT

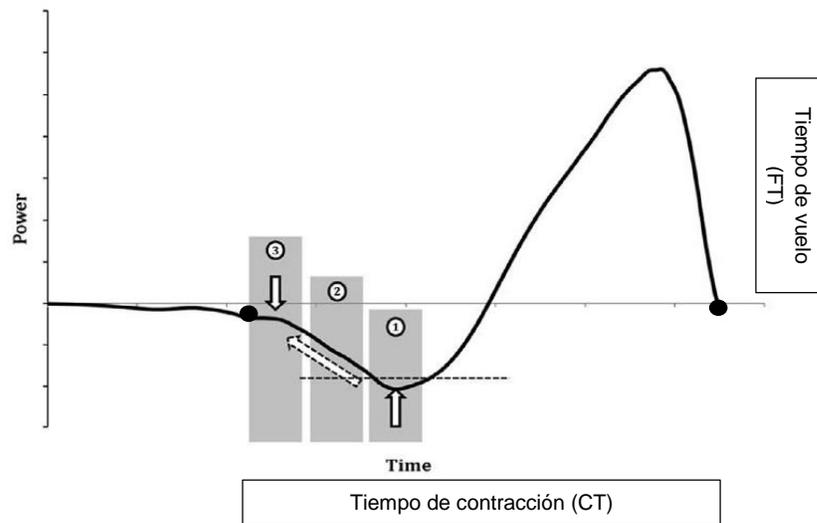


Imagen tomada del artículo: Gathercole et al (2015). Alternative countermovement jump analysis to quantify acute neuromuscular fatigue. International Journal of Sports Physiology and Performance.

12.6. Fases del salto contra movimiento

Dentro del salto contra movimiento (fase de ascenso despegue y descenso aterrizaje) se definen las siguientes fases: (Figura 14)

12.6.1. (Fase de ascenso - despegue): (Bosco et al, 1979).

12.6.1.1. Promedio de fuerza concéntrica:

Resultado de la fuerza del periodo concéntrico generado durante el acortamiento muscular agonista dentro del salto realizado. Unidad de medida en newton (N)

12.6.1.2. Promedio de fuerza excéntrica:

Resultado de la fuerza del periodo excéntrico generado durante el alargamiento muscular antagonista dentro del salto realizado. Unidad de medida en newton (N)

12.6.1.3. Promedio del índice de fuerza concéntrica desarrollada:

Resultado del índice de fuerza concéntrica de la capacidad de generación de impulso del músculo cuádriceps. Unidad de medida en newton sobre segundo (N/s)

12.6.1.4. Pico de fuerza concéntrica:

Valor máximo de la fuerza de reacción del suelo significativamente relacionado con la actividad muscular, en particular a la del vasto lateral del cuádriceps. Unidad de medida en newton (N)

12.6.1.5. Pico de velocidad concéntrica:

Tiempo de empuje (velocidad) generado durante el acortamiento muscular agonista dentro del salto realizado. Unidad de medida en metros sobre segundos (m/s)

12.6.1.6. Pico de fuerza relativa concéntrica:

El valor pico de la fuerza de reacción del suelo es relativa con la actividad muscular, en particular a la del vasto lateral del cuádriceps. Unidad de medida en

newton sobre kilogramo (N/Kg)

12.6.1.7. Tiempo de pico de fuerza concéntrica:

duración de la máxima producción de fuerza concéntrica durante el salto. Unidad de medida en segundos (s)

12.6.1.8. Tiempo de vuelo:

Duración desde el inicio del salto hasta el aterrizaje. Unidad de medida en segundos (s)

12.6.1.9. Altura de salto:

Medición de la longitud del salto. Unidad de medida en centímetros (cm)

12.6.1.10. Pico de potencia:

Máxima generación de fuerza por velocidad durante el salto. Unidad de medida en vatios (W)

12.6.1.11. Pico de potencia relativo:

Máxima generación de fuerza por velocidad en relación con otras variables. Unidad de medida en vatios (W)

12.6.2. (Fase de descenso - aterrizaje)

12.6.2.1. Índice de fuerza desarrollada en el aterrizaje:

Es el valor de la capacidad de generación de fuerza desaceleradora muscular.

Unidad de medida en newtons sobre segundos (N/s)

12.6.2.2. Pico de fuerza de aterrizaje:

Unidad del valor de pico de la fuerza de acción del suelo donde la fuerza generada al momento de la caída es dividida por el peso del sujeto. Unidad de medida en newton (N)

12.6.2.3. Pico relativo de fuerza de aterrizaje:

Máxima generación de fuerza por velocidad generada al momento de la caída, dividida por el peso del sujeto en relación con otras variables. Unidad de medida en newton sobre kilogramo (N/Kg)

13. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SALTO CONTRA MOVIMIENTO CON EL SOFTWARE INFORMÁTICO DE MEDICIÓN

Figura 14. Fases del salto contra movimiento.

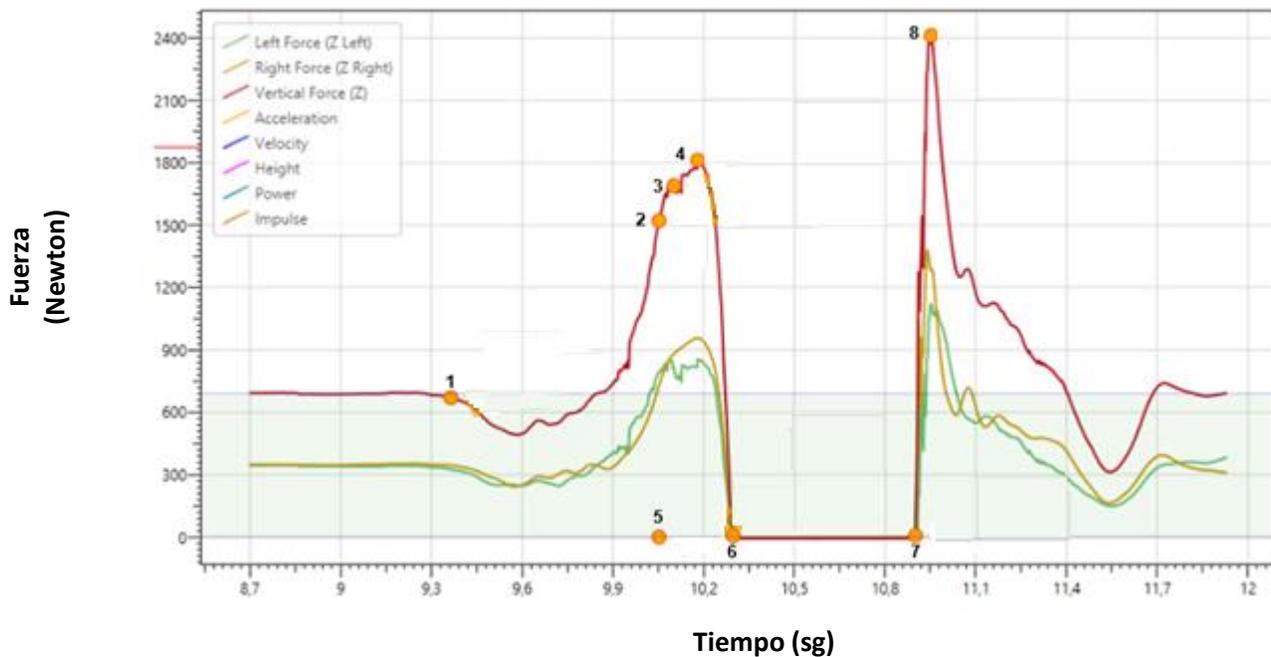


Imagen de muestra tomada del software informático de medición “force deck” (Neuromuscular performance technologies, versión 105197 Build 37401). Centro de ciencias del deporte. Biomédicos. Coldeportes – Bogotá - Julio de 2015

1. Inicio del movimiento: (Start of Movement)
2. Inicio del máximo índice de desarrollo de la fuerza: (Start of Max rate of force development)
3. Final del máximo índice de desarrollo de la fuerza: (End of Max rate of force development)
4. Fuerza máxima de despegue: (Peak Takeoff Force)
5. Inicio de la fase concéntrica: (Start of Concentric Phase)
6. Despegue. (Takeoff)

7. Aterrizaje: (Landing)
8. Pico de aterrizaje: (Peak landing)

14. MARCO DE REFERENCIA

Gathercole y cols. (2015) realizaron un estudio en donde el objetivo fue determinar la idoneidad de la prueba del salto contra movimiento CMJ para la evaluación de los cambios inducidos por la fatiga neuromuscular después de un protocolo de carrera fatigante e intermitente de alta intensidad en once (11) hombres atletas universitarios. Se evaluó a los deportistas realizando 6 ensayos en 6 ocasiones en las primeras 3 visitas de los participantes (0, 24, y 72 horas después del ejercicio).

Un segundo objetivo fue examinar la utilidad de las 22 variables: 16 típicas (CMJ TYP): pico de potencia, potencia media, índice máximo del desarrollo de potencia, tiempo de pico de potencia, pico de fuerza, fuerza media, índice máximo del desarrollo de fuerza, tiempo pico de fuerza, impulso total, impulso relativo neto, velocidad pico, mínima velocidad, velocidad pico de potencia, tiempo de vuelo, relación tiempo de vuelo y tiempo de contracción, altura del salto y 6 alternativas (CMJ-ALT): fuerza a velocidad cero, área bajo el signo fuerza velocidad, duración excéntrica, duración concéntrica, duración total, potencia media excéntrica y concéntrica sobre el tiempo del salto contra movimiento CMJ, basado en métodos anteriores, hacia la detección y recuperación de la fatiga, después del protocolo fatigante.

Como resultado no se evidencian cambios significativos en el desempeño del salto contra movimiento CMJ en los deportistas. A las 0 horas, 14 de las variables típicas CMJ TYP y 4 variables CMJ ALT muestran pequeñas a moderadas cambios en comparación con la línea base. Estos hallazgos sugieren que la prueba de salto contra movimiento CMJ podría ser un método adecuado, no invasivo para el uso en el monitoreo de la fatiga neuromuscular.

Tabla 1. Definición de términos variables del salto contra movimiento CMJ

TERMINOS DE VARIABLES DEL SALTO CONTRA MOVIMIENTO CMJ		
VARIABLE	ABREVIACION	DESCRIPCION
JH	Jump Height (Altura del salto)	Altura máxima de salto alcanzada
FT	Flight Time (Tiempo de vuelo)	El tiempo empleado en el aire desde el despegue hasta el aterrizaje del salto
PP	Peak Power (Pico de potencia)	La mayor potencia alcanzada durante el salto
MF	Mean force (Fuerza promedio)	Promedio de la fuerza generada durante la fase concéntrica del salto.
TTPF	Time to peak force (Tiempo a la fuerza pico)	Tiempo desde el inicio del salto hasta el pico de fuerza
CT	Contraction time (Tiempo de contracción)	Duración desde el inicio del salto hasta el despegue
FT:CT	Flight time: Contraction time (tiempo de vuelo: tiempo de contracción TV:TC)	Relación entre el tiempo de vuelo sobre el tiempo de contracción

14.1. MARCO METODOLÓGICO

14.1.1. Tipo de Estudio

El tipo de estudio a realizar será de carácter cuasi experimental. Se denomina cuasi experimental por qué no se tiene control sobre algunas de las variables de confusión que logren intervenir y modificar los resultados del estudio.

14.1.2. Aspectos éticos

El presente fue un proyecto de investigación dando cumplimiento a la normatividad establecida en la resolución No. 008430 de 1993, según el artículo 11 literal b) que establece “investigación con riesgo mínimo: investigación en seres humanos, masculinos mayores de edad, deportistas de alto rendimiento, con un muestreo no probabilístico”.

La presente investigación fue sometida a la evaluación del Comité de Ética de la facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia para su aprobación. Se requirió la aprobación de los deportistas incluidos en el estudio por medio del formato de consentimiento informado, el cual fue firmado, sin que ello impidiera el transcurso normal de la investigación.

14.1.3. Consentimiento informado

Se informó a cada deportista sobre su participación voluntaria, objetivo de la investigación, beneficios, intervenciones y riesgos esperados los cuales se dieron a conocer a través de un consentimiento informado; el cual fue aprobado y avalado por el comité de ética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Se dieron a conocer los resultados del proyecto a los deportistas con la

libre intención de que pudieran desistir de continuar con la investigación. (Anexo 1)

14.1.4. Población objeto

Ocho (n=8) atletas de rendimiento hombres voluntarios entre las edades de 19 - 35 años, entrenados en deportes de resistencia, en las modalidades de atletismo fondo. Los participantes diligenciaron el consentimiento informado, previamente avalado y revisado por el comité de ética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

14.1.5. Criterios de inclusión y exclusión

Para el estudio se tomó una muestra de deportistas hombres con un rango de edad entre los 19 y 35 años, que practican deportes de resistencia, IMC entre 19 y 24, su nivel de entrenamiento fue mayor a 6 meses, junto con una intensidad de entrenamiento superior a 10 horas/semana y aptitud física en óptimas condiciones según la valoración médica. Todos se consideraron atletas de élite por participar con éxito en eventos de categoría nacional e internacional. (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
<ul style="list-style-type: none"> • Deportistas de resistencia de rendimiento. • Hombres • Edad entre 19 y 35 años de edad. • No fumadores • No ingesta de medicamentos • Sin discapacidad física o mental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Individuos con lesiones osteo musculares recientes o agudas. • Padecimiento de enfermedades cardiovasculares. • Tratamiento farmacológico y/o nutricional • Estar en competencia deportiva. • No haber firmado y entregado el consentimiento informado.

14.2. Metodología

14.2.1. Convocatoria de voluntarios y socialización de estudio

Se convocó a capacitación a entrenadores y un grupo primario del Centro de Ciencias del Deporte, con el fin de socializar los objetivos y metodología del estudio, al igual que resaltar la importancia de la colaboración del grupo.

Se realizó un desplazamiento hasta el sitio de entrenamiento, con el fin de motivar a los atletas en la participación en la investigación, mostrando objetivos, beneficios y metodología de la misma.

Al finalizar, se realizó una reunión con los sujetos que voluntariamente participaron en el estudio para la recolección de datos y diligenciamiento del consentimiento informado.

14.2.2. Valoración

Los participantes asistieron al Centro de Ciencias del Deporte (Coldeportes), con el fin de realizar una valoración médica inicial; se recogieron datos personales y antecedentes, nivel de entrenamiento, examen físico, medición de talla y peso.

14.2.3. Pre test

Se aplicaron pruebas bioquímicas y de rendimiento (salto contra movimiento) realizadas en el siguiente orden (Gráficas 15 y 16):

Bioquímica: la medición de CPK, se realizó a través del equipo Reflotron ® Plus. (2008, Roche Diagnostics, S.L) Figura 7.1. Para la toma de la muestra sanguínea, se realiza una punción en el lóbulo de la oreja para conseguir sangre capilar; posteriormente el análisis se ejecuta por medio de tiras reactivas de prueba Reflotron. Los valores de referencia en la CPK van desde 200 a 250 U/L en hombres (Orrego & Monsalve, 2006).

Rendimiento: El individuo debe mantenerse de pie, posición vertical, las manos en la cintura y pies ubicados a la anchura de los hombros, posteriormente se realizará una flexión de rodillas de 90° y un salto tan alto como sea posible sin pausa. Los saltos se desarrollarán en una plataforma de fuerza (Hori, 2009). (Figura 10). Los deportistas realizarán individualmente 3 saltos, cada uno con un período de descanso de 10 segundos.

Figura 15. Salto contra movimiento.



Imagen de muestra tomada a deportista de resistencia en evaluación de salto contra movimiento (CMJ) con plataforma de fuerza. Centro de ciencias del deporte. Biomédicos. Coldeportes – Bogotá - Julio de 2015

Figura 16. Gráfico del salto contra movimiento.

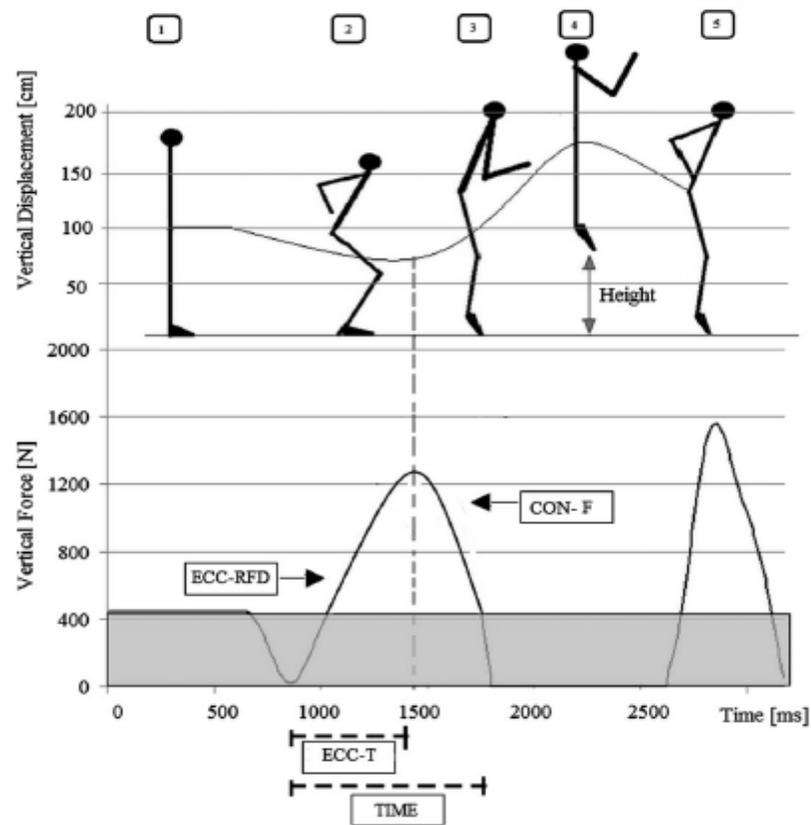
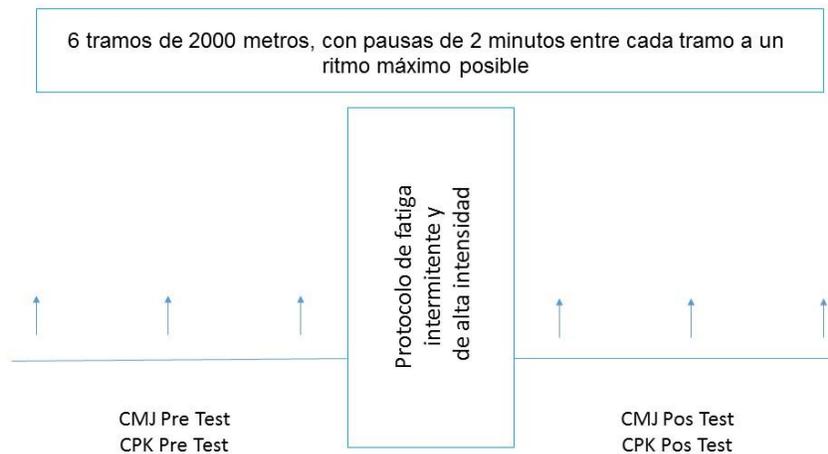


Imagen tomada del artículo: Laffaye, G, Wagner, P, and Tombleson, T. (2013). Countermovement Jump height: Gender and sport-specific differences in the force-time variables. Journal of Strength and Conditioning Research

14.2.4. Protocolo fatigante

Deportistas de fondo: 6 tramos de 2000 metros, con pausas de 2 minutos entre cada tramo a máximo ritmo posible y con el gesto específico de la modalidad deportiva. El tiempo de cada tramo varía de acuerdo con las condiciones de cada deportista (4:10 K a 4:50k). Todas las actividades se realizaron al máximo ritmo posible para el tiempo de cada repetición, que son por encima del ritmo de carrera, estos protocolos fueron diseñados con participación del entrenador nacional, de acuerdo con la intensidad y duración que más fatiga producía habitualmente en los atletas. El objetivo es causar la máxima fatiga posible mediada por intensidad específica no por volumen de entrenamiento. Independientemente de la modalidad el objetivo es causar fatiga neuromuscular. Información introducida de la tesis Efecto de la neuroestimulación vascular sobre el músculo liso en la recuperación post ejercicio en atletas. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. (Ospina, 2015). (Figura 17)

Figura 17. Protocolo de fatiga intermitente y de alta intensidad



Representación esquemática del protocolo de fatiga. (Elaboración propia)

14.2.5. Post test

Se realizó medición de rendimiento y bioquímicas bajo los mismos parámetros iniciales, posterior a la aplicación de un protocolo fatigante.

14.2.6. Variables

Las variables del salto contra movimiento CMJ se registraron y analizaron mediante la extracción de los datos desde el uso de la plataforma de contacto de marca "Pasport" realizando la medición de la fuerza de reacción vertical de los deportistas en conjunto con el software "force deck: neuromuscular performance technologies, versión 105197 Build 37401". Todas las variables CMJ se describen en la Tabla 3.

14.2.7. Intervención

Se realizaron 2 intervenciones, separadas cada una por la duración del protocolo de alta intensidad intermitente o protocolo fatigante.

14.2.8. Instrumentos de recolección de información

La información se obtuvo de las historias clínicas realizadas a los deportistas participantes en la etapa de tamizaje. Se tomaron los datos del instrumento de recolección y se digitaron en una base de datos en Excel.

La información se recolecta en dos momentos: una primera toma de información se realiza en estado de reposo (pre-test) y posterior al protocolo fatigante, se procede a realizar una nueva recolección de datos (post-test).

15. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software estadístico SPSS versión 22. Los resultados se obtienen como media \pm desviación estándar (DS), la significancia estadística se constituye cuando $p \leq 0.05$.

Dentro de la prueba de Shapiro Wilk considera que algunas variables se comportan normalmente; el análisis de esta variable se relaciona en la tabla 8-2

Las diferencias en los parámetros de fatiga neuromuscular antes del test y posterior al test de salto contra movimiento, se analizaron a través de la prueba no paramétrica del signo (Wilcoxon). Dicha prueba del signo se usa para realizar una comparación de dos grupos relacionados, cuando no se cumple una distribución normal de datos o en caso de variables ordinales (Cáceres, 1994).

Además se utilizaron pruebas de correlación de Pearson para evaluar la relación entre las variables del salto contra movimiento CMJ y la variable bioquímica CPK. El nivel de significación se fijó en $p > 0,05$.

16. RESULTADOS

Una vez recolectados los datos de los deportistas se estudiaron las variables de edad, peso, talla, IMC, realizando descripciones de los promedios con su desviación estándar y se analizó la diferencia mediante un valor de significancia menor de 0.05.

Los ocho deportistas de resistencia incluidos en el estudio poseen un rango de edad entre los 19 y 35 años. El entrenamiento de cada individuo es mayor a 10 horas/semana. Realizan competencias regularmente dependiendo de su modalidad al representar al equipo nacional de Colombia. Los datos descriptivos demográficos

Tabla 3. Datos demográficos de la muestra

	Edad	Talla (cm)	Peso (kg)	IMC
Promedios	24,44	1,70	61,65	21,22
Desviación Estándar	5,07	0,06	8,40	1,74
C. Variación	21%	4%	14%	8%

Tabla tomada de: Ospina AL. (2015). Efecto de la neuroestimulación vascular sobre el músculo liso en la recuperación post ejercicio en atletas. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Los deportistas partícipes del estudio presentan homogeneidad en talla, edad, peso e IMC. Tomado de: Ospina AL. (2015). Efecto de la neuroestimulación vascular sobre el músculo liso en la recuperación post ejercicio en atletas. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

En primer lugar, se analizaron las características estadísticas y distribución de los

datos obtenidos de las variables del salto contra movimiento y CPK medidos en el grupo de deportistas.

Al realizar las pruebas mencionadas se halló que en varias de las mediciones de las variables no existía normalidad y homogeneidad de las medias, ni simetría en la distribución, por lo tanto, el análisis de los datos se dirigió a pruebas no paramétricas. El análisis de los datos se realizó mediante una comparación exploratoria de las medianas de las variables pre y pos fatiga.

16.1. Diferencias pre y pos protocolo de fatiga

16.1.2. Normalidad de los datos

Con el fin de probar la normalidad de los datos y que la muestra presenta una distribución normal, se realizó la prueba de Shapiro Wilk. En la mayoría de las variables se encuentran valores superiores al valor de $p \leq 0.05$. (Tabla 4)

Con el fin de determinar si las diferentes mediciones de las variables del salto contra movimiento CMJ presentan diferencias significativas en los deportistas antes del protocolo de fatiga (muestra pre) y después del protocolo de fatiga (muestra pos), se procedió a aplicar la prueba del signo (wilcoxon) (Tabla 5). Se determina que no existen diferencias estadísticas en las variables de: fuerza promedio ($p=0,889$), tiempo a la fuerza pico ($p=0,483$), altura del salto ($p=0,093$), tiempo de vuelo. ($P=0,125$) y CPK ($p=0,575$). Existen diferencias significativas en el pico de potencia ($p= 0,017$) y el tiempo de contracción ($p=0,036$).

Tabla 4. Prueba de shapiro wilk

Pruebas de normalidad			
Variable	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
pico de potencia pre	,978	8	,950
pico de potencia pos	,895	8	,261
Fuerza promedio pre	,937	8	,578
Fuerza promedio pos	,928	8	,498
Tiempo a la fuerza pico pre	,801	8	,030
Tiempo a la fuerza pico pos	,848	8	,091
Tiempo de contracción pre	,901	8	,294
Tiempo de contracción pos	,883	8	,203
Altura del salto pre	,921	8	,442
Altura del salto pos	,902	8	,301
TV:TC PRE	,946	8	,667
TV:TC POS	,839	8	,073
CPKPRE	,673	8	,001
CPKPOS	,686	8	,002
Tiempo de vuelo pre	,906	8	,324
Tiempo de vuelo pos	,926	8	,483

Tabla 5. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo

Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo								
	pico de potencia pos - pico de potencia pre	Fuerza promedio pos - Fuerza promedio pre	Tiempo a la fuerza pico pos - Tiempo a la fuerza pico pre	Tiempo de contracción pos - Tiempo de contracción pre	Altura del salto pos - Altura del salto pre	TV:TC POS - TV:TC	CPKPOS - CPKPRE	Tiempo de vuelo pos - Tiempo de vuelo pre
Z	-2,380 ^b	-,140 ^b	-,701 ^b	-2,100 ^b	-1,680 ^b	-1,400 ^c	-,560 ^c	-1,532 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	0,017	0,889	0,483	0,036	0,093	0,161	0,575	0,125

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo b. Se basa en rangos positivos. c. Se basa en rangos negativos.

Figura 18. Variables de pico de potencia pre y pos test

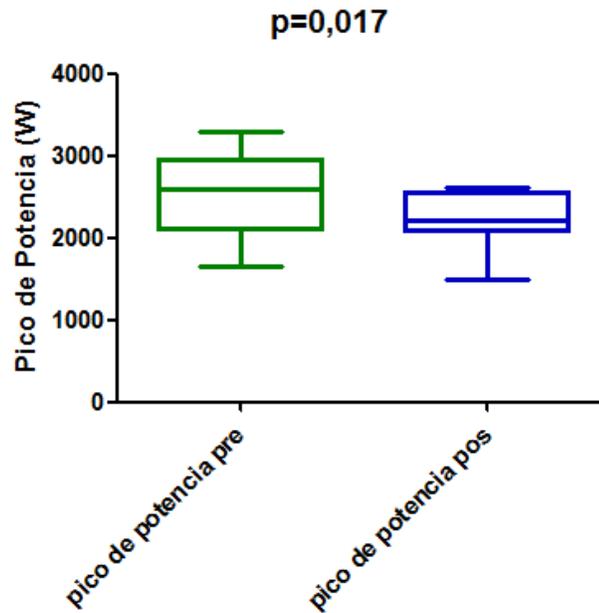


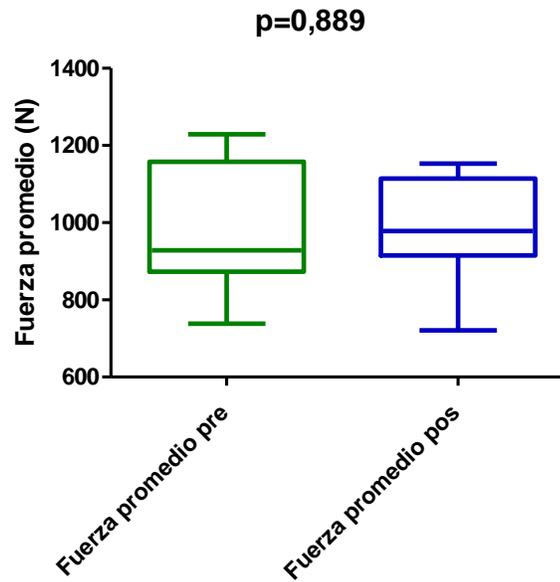
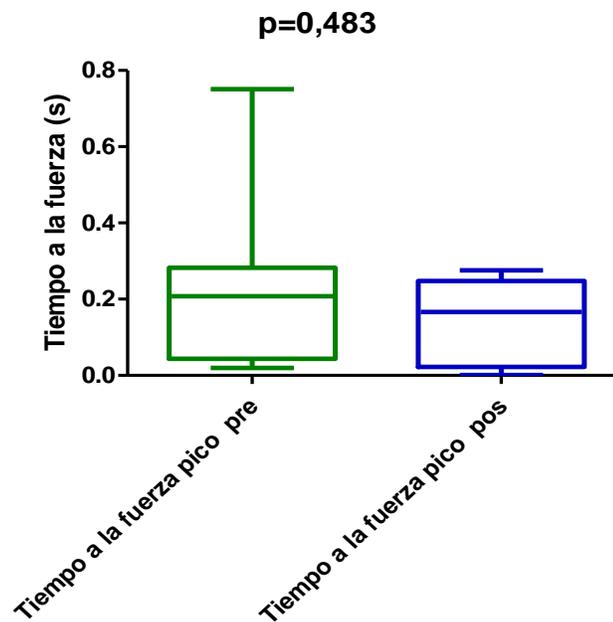
Figura 19. Variables de fuerza promedio pre y pos test**Figura 20.** Variables de tiempo a la fuerza pico pre y pos test

Figura 21. Variables de tiempo de contracción pre y pos test

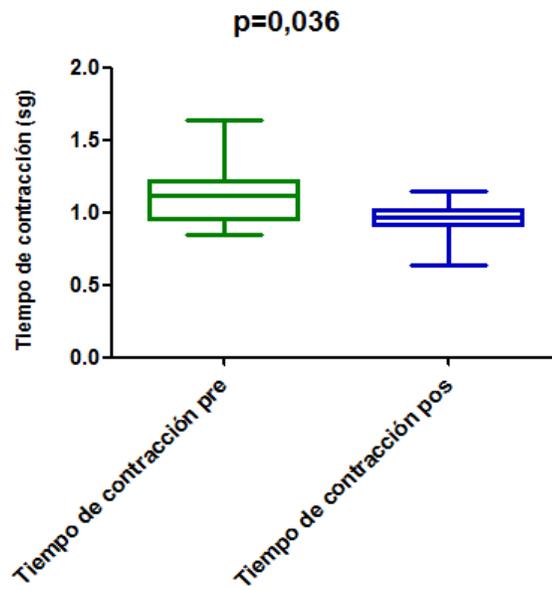


Figura 22. Variables de altura del salto pre y pos test

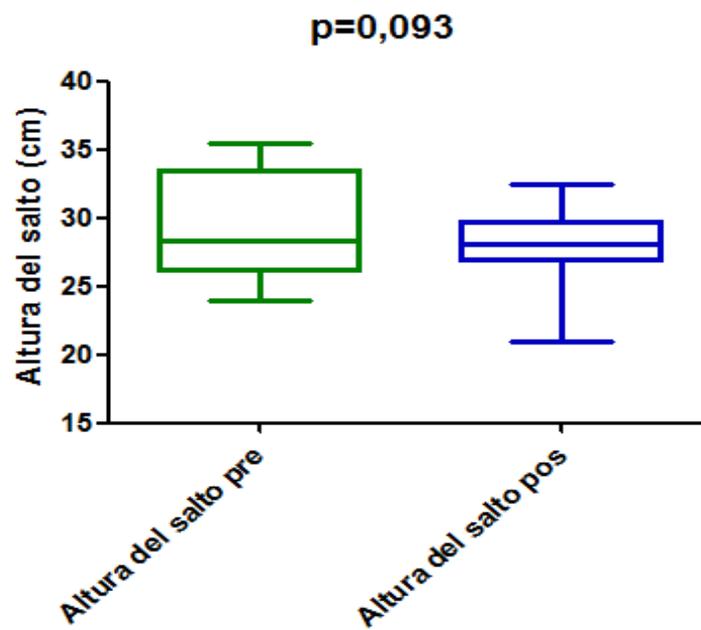


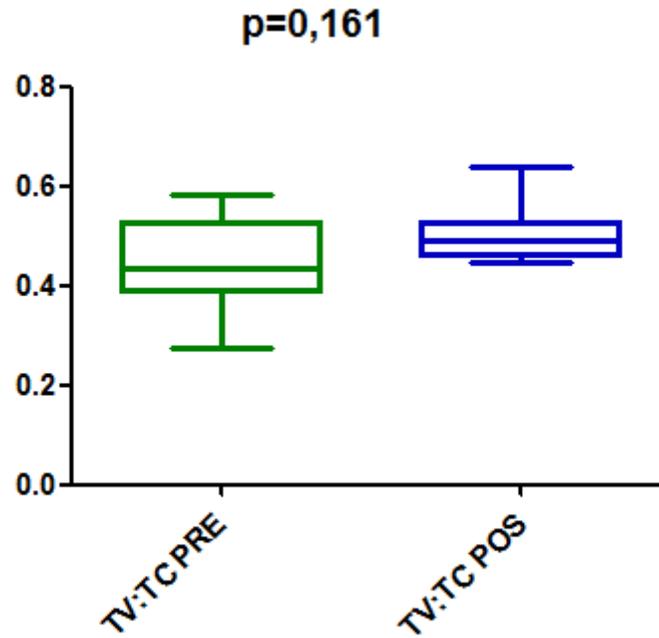
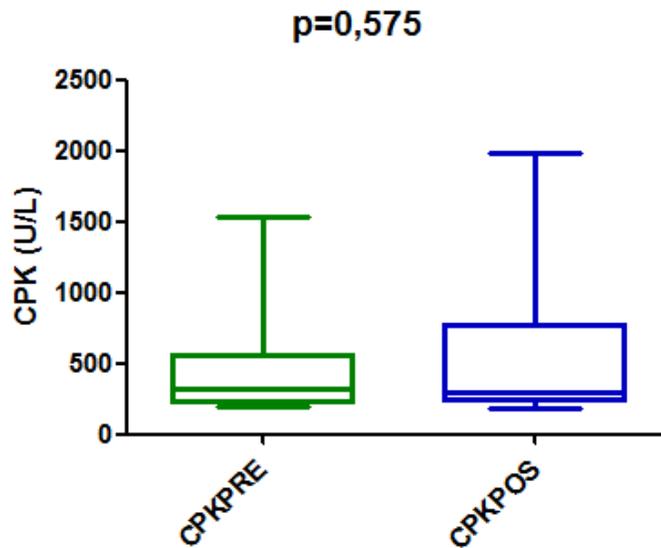
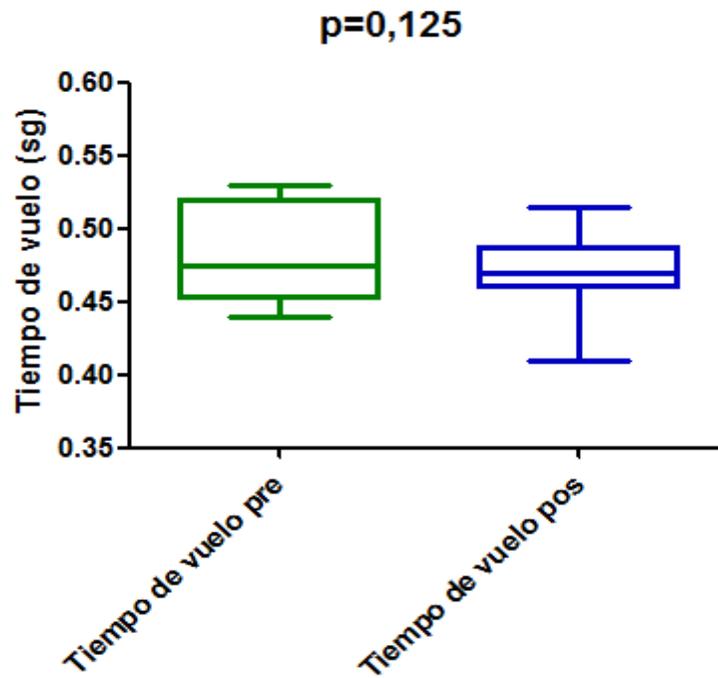
Figura 23. Variables de TV: TC pre y pos test**Figura 24.** Variables de CPK pre y pos test

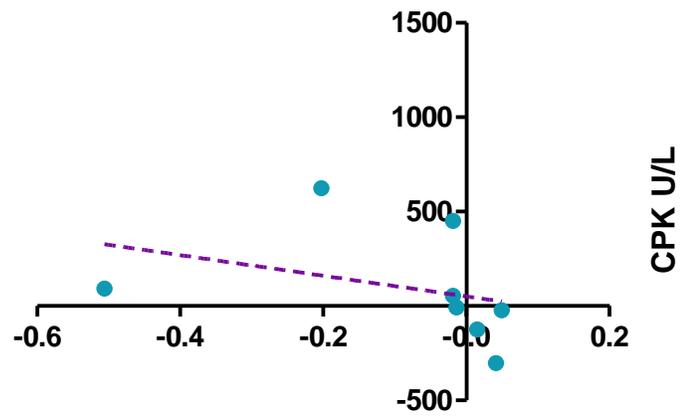
Figura 25. Variables de tiempo de vuelo pre y pos test



CORRELACIONES

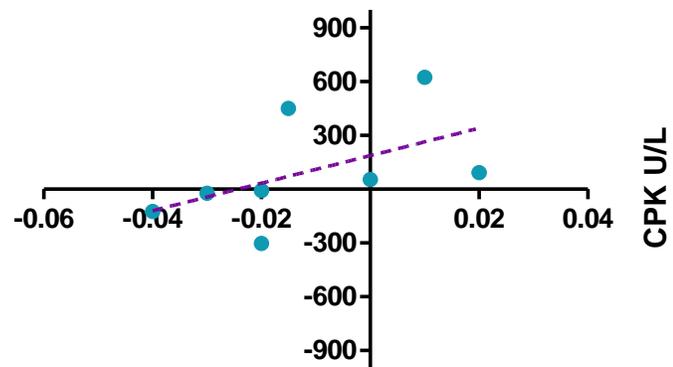
Se realizó el análisis de las correlaciones de Spearman entre el delta de las variables del desempeño del salto con las diferencias de la CPK. Se encontraron diferencias significativas en las variables de (^) tiempo a la fuerza pico ($p=0,015$) ($r= -0,810$) y (^) tiempo de vuelo ($p=0,015$) ($r=0,810$). Es decir que la CPK en correlación con las variables de TTPF y FT tiene una relación directa en la valoración de la fatiga neuromuscular.

Figura 26. Correlación $\hat{\Delta}$ Tiempo a la fuerza - $\hat{\Delta}$ CPK



Diferencia Tiempo a la fuerza Pico

Figura 27. Correlación $\hat{\Delta}$ Tiempo de vuelo - $\hat{\Delta}$ CPK



Diferencia tiempo de vuelo

17. DISCUSIÓN

La fatiga muscular dentro del ámbito deportivo es un resultado del ejercicio prolongado, ya que debido a cambios metabólicos en las fibras que actúan, se puede disminuir la capacidad de producción de fuerza mediante una alteración de la actividad excitatoria de la membrana muscular y la contracción. El ejercicio de alta intensidad provocará el agotamiento del glucógeno muscular modificando su proceso metabólico. De otro modo el riesgo de lesión, la dificultad de recuperación y el cambio de patrones de activación muscular son factores de gran interés en los deportistas ya que pueden interferir con su rendimiento. (St Clair Gibson A, et al, 2001) (Vanmeerhaeghe, et al, 2013).

Diversos estudios (Coutts et al., 2007) (Cormacks et al., 2008c) han investigado la importancia e influencia de la función neuromuscular y los factores que comprometen a los deportistas que compiten en carreras de larga distancia. De acuerdo a lo anterior es importante destacar los parámetros de rendimiento y recuperación a través de factores de fuerza muscular en deportes de resistencia.

De acuerdo con la relación de evaluación de la función neuromuscular y las diferentes modalidades de entrenamiento de la fuerza, con énfasis en las características de resistencia y potencia, se ha demostrado que la promoción de una economía de carrera y el funcionamiento neuromuscular óptimo, evidencia un mayor rendimiento en la capacidad de resistencia.

A pesar del proceso fatigante y de agotamiento evidenciado en los deportistas de resistencia posterior a la competencia o al entrenamiento, se establece que el rendimiento puede mejorar aun en presencia de lesión muscular, debido a las diversas adaptaciones metabólicas y neuromusculares que experimenta el deportista en el momento de mejorar sus resultados identificados por medio de un test de carrera. (Esteve Lanao J, et al., 2008)

Por lo tanto la evaluación de la condición neuromuscular al mismo tiempo que el rendimiento de carrera se debe considerar dentro del proceso de monitorización y seguimiento de la función neuromuscular en deportistas de resistencia.

Por consiguiente es de gran importancia identificar los factores que generan la fatiga con el fin de controlar y monitorización las situaciones específicas alrededor del proceso de entrenamiento del atleta. Estudios sobre monitorización de la fatiga neuromuscular (FNM) en atletas utilizando plataforma de fuerza (Laffaye 2014, Cormack 2008, Quagliarella 2001) demuestran la utilidad de la evaluación de la fatiga por medio del salto contra movimiento (CMJ) para analizar las variables del salto y su desempeño.

Un estudio reciente realizado por Gathercole y colaboradores (2015a), determinó la confiabilidad, magnitud del cambio y utilidad de la monitorización de la fatiga con la prueba del salto contra movimiento (CMJ) después de un ejercicio fatigante en atletas, describiendo los cambios generados en la función neuromuscular (FNM) y analizando un conjunto de variables relacionadas con la mecánica del (CMJ). Once atletas masculinos de deportes de conjunto desarrollaron 6 intentos de salto en 6 oportunidades. Un total de 22 variables, 16 típicas (CMJ-TYP) y 6 alternas (CMJ-ALT) fueron examinadas.

La reproducibilidad se soporta en examinar a los participantes en tres visitas. Posteriormente se evaluó a los deportistas (0 horas, 24 y 72 horas pos ejercicio) seguido de un protocolo de carrera continua intermitente de alta intensidad. Los datos fueron registrados inmediatamente pos fatiga (agudo). A las 24 horas pos fatiga, la mayoría de las variables muestran tendencias de retorno hacia los valores basales, lo que podría explicar las modificaciones de resultados de la fatiga aguda. A las 72 horas se observaron pequeños incrementos en las variables del desempeño del CMJ relacionados con el tiempo.

Al comparar los datos obtenidos en este estudio junto con los del autor Gathercole y colaboradores (2015a), se argumenta que al evaluar el estado neuromuscular y el ciclo acortamiento estiramiento, la recuperación posterior a la fatiga tiene un comportamiento bifásico, en donde dicha cualidad disminuye inmediatamente en un corto plazo (1 a 2 horas). Lo anterior destaca que los valores del registro de las variables del desempeño del salto contra movimiento (CMJ) pueden ser diferentes según el tiempo de evaluación pos fatiga.

En el estudio realizado por Boullosa y colaboradores (2011) se evaluaron 22 atletas de resistencia para identificar el estado de fatiga concurrente y la potenciación posactivación. Los deportistas realizaron dos intentos de salto contra movimiento (CMJ) en una plataforma de fuerza y una prueba de velocidad máxima de carrera sobre una distancia de 20 metros antes y después del Test de Pista de la Universidad de Montreal (UMTT).

Los resultados mostraron una mejora en la altura del CMJ después del test de pista (UMTT) que se correlacionan con el incremento en la potencia pico. A partir de esta investigación se destaca la importancia de la monitorización de la fatiga neuromuscular con plataformas de fuerza y la prueba del salto contra movimiento (CMJ) para evaluar las adaptaciones musculares en deportistas de resistencia. Existen características semejantes de protocolo de acuerdo al desarrollo de la presente investigación.

Según Terrados y colaboradores (2004) la clasificación de la fatiga en el tiempo corresponde a los estados de agudo, subagudo y crónico. De este modo los deportistas presentan una fatiga de carácter residual y progresiva desde el momento del entrenamiento o competencia. Por lo tanto la monitorización de dicho aspecto es parte fundamental de su desempeño, recuperación y rendimiento sobre la condición del atleta.

La escases de equipos de medición y precisión, la dificultad técnica y el escaso abordaje investigativo sobre la fatiga neuromuscular, aportan al presente estudio

un avance significativo al identificar las variables del desempeño del salto contra movimiento CMJ para una fase aguda midiendo indicadores bioquímicos y de rendimiento, especialmente en deportistas de resistencia, destacando la particularidad del proceso de fatiga por la economía en la técnica de ejecución, los patrones de movimiento y la especialización de las fibras musculares (Bosco et al., 1979, Kubo et al., 2006).

Otro de los aspectos importantes de la monitorización de la fatiga neuromuscular es proporcionar información objetiva a entrenadores y atletas sobre el proceso de entrenamiento, fatiga y recuperación del deportista en comparación con otros marcadores indirectos, tales como los cuestionarios subjetivos (Twist et al., 2013).

Dichos resultados argumentan la variación del desempeño en el salto post ejercicio y a una especificidad en atletas de resistencia debido a la especialización del trabajo muscular aún en presencia de fatiga neuromuscular (Boullosa et ál., 2011).

En los estudios de Gathercole et al, (2015b), McLellan et al, (2011) y Cormack et al, (2008b), se encontraron diferencias significativas donde los valores de las variables (PP, TTPF, CT, JH, FT) del salto contra movimiento (CMJ) disminuyeron posterior al protocolo de fatiga. De esta manera los cambios observados explican la relación entre la alteración de la fatiga neuromuscular y el desempeño del (CMJ), debido a la lesión o daño que se da en la fibra muscular. Los resultados obtenidos son congruentes con los encontrados en el presente estudio.

En cuanto a la estructura y función muscular, se puede decir que el impulso mecánico en el momento del despegue, se ve influenciado por la modificación de la función neuromuscular generando una variación en el reclutamiento de unidades motoras debido a la deficiencia en la capacidad contráctil y elongativa del músculo, así como la alteración de la transmisión del impulso neuronal a nivel periférico que causa el estado de fatiga. (Brancaccio, et al, 2010)

De otro modo el músculo fatigado puede compensar los valores de la altura del salto, modificando el proceso contráctil y más aún en los deportistas de resistencia en donde la especificidad del entrenamiento y sus adaptaciones musculares los hace más resistentes a la fatiga. (Snieckus et al., 2013). Las fibras Tipo IIa tienen un potencial oxidativo similar a las de Tipo I y a intensidad de competición tienen una mayor capacidad de generar fuerza lo que explicaría las compensaciones mencionadas. (Hawley JA, 2001, 2002)

Por otro parte Markovic y colaboradores (2004) destaca el test de salto contra movimiento dentro de la valoración de la potencia explosiva y la fatiga neuromuscular de los miembros inferiores de deportistas valorados con plataforma de fuerza. Según este estudio las variables de altura del salto y tiempo de vuelo no se afectan dentro de la función neuromuscular (FNM), contrario a las variables del desempeño del salto.

Por consiguiente estos hallazgos destacan que la evaluación y monitoreo de la fatiga neuromuscular debe realizarse con equipos tecnológicos como la plataforma de fuerza. Dicho equipo mide la fuerza ejercida por un sujeto de acuerdo con la tercera ley del movimiento de Newton. En el movimiento humano terrestre, la fuerza ejercida por la plataforma en el cuerpo se conoce comúnmente como la "fuerza de reacción del suelo". (Linthorne N, 2001)

La variable del pico de potencia (PP) que relaciona la producción de trabajo por unidad de tiempo, podría compensar la altura del salto y reducir el valor de la potencia máxima realizada en el movimiento, al cambiar el patrón de reclutamiento neuromuscular, donde el patrón aferente reducido produce una inhibición reflexógena central de las motoneuronas que inervan el musculo afectado (Chaitow L, et al., 2007). Estos resultados son congruentes con los encontrados en el presente estudio.

Consecuentemente al generarse una fatiga en el desempeño de la potencia, puede alterar otras variables causando un efecto sobre el tiempo de vuelo, tiempo de contracción, duración de la fase excéntrica, duración de la fase concéntrica,

tiempo total de la contracción y el promedio de la fuerza como se concluye en el estudio de Gathercole y colaboradores (2015, 2015b), ya que las fibras de contracción rápida son más fatigables. Este y otros autores (Cormack, et al, 2008a) (Boullosa, et al, 2011) estudiaron el desempeño en el salto en deportes con contenido explosivo. En el presente estudio este comportamiento es diferente debido a que se evaluaron deportistas de resistencia.

No se evidenciaron diferencias significativas en la fuerza promedio ($p=0,889$), el tiempo a la fuerza pico ($p=0,889$), altura del salto ($p=0,093$), tiempo de vuelo ($p=0,125$) y el tiempo de vuelo en relación con el tiempo de contracción (TV: TC) ($p=0,161$). Estos resultados concuerdan con los estudios encontrados en McLellan et al, (2011) (Cormack, et al, 2008 a, b) (Boullosa, et al, 2011), donde se evaluaron la confiabilidad y magnitud del cambio después de un ejercicio fatigante a través de la prueba del salto contra movimiento (CMJ).

De acuerdo a lo anterior los resultados de este estudio revelaron que la mayoría de las variables del salto contra movimiento CMJ indican una baja relación entre el pre test y el post test del protocolo fatigante al no demostrar cambios significativos ($p > 0,05$). Contrario a lo reportado en otros estudios (Boullosa, et al, 2011) (Cormack, et al, 2008 a, b), es probable que el efecto del entrenamiento de resistencia no cambie de manera significativa la FNM.

Los resultados muestran que a partir de la fatiga neuromuscular periférica se pueden generar compensaciones de orden nervioso, metabólico u energético los cuales estimulen la capacidad contráctil del músculo y la capacidad individual de soportar un ejercicio intenso y exhaustivo (Yuan et.al 2002) (Nybo, et.al 2005).

Dichos resultados se presentan a pesar de la disminución en la propagación del potencial de acción y presentando niveles de fatiga muscular periférica. (Edwards et al., 1977a, b) Los resultados de las variables plantean una adaptación muscular de los deportistas de resistencia debido al aumento en la capacidad oxidativa de los músculos de producir energía gracias al aumento del número y

dimensión de las mitocondrias, así como una mayor actividad de las enzimas mitocondriales por unidad de masa muscular de las fibras rápidas y su relación con su estimulación nerviosa. (Verkhoshansky, 2007)

La CPK es el biomarcador utilizado para establecer la magnitud de la alteración del músculo estriado posterior al ejercicio. (Brancaccio, et al., 2010). La CPK como marcador bioquímico medido dentro de la evaluación del desempeño del CMJ en los deportistas, aumenta post ejercicio como consecuencia del daño de la membrana muscular y otros mecanismos. Las contracciones excéntricas son la mayor causa de micro lesión y salida extracelular hacia la circulación, por lo que ha sido ampliamente utilizada para el monitoreo de la fatiga y recuperación en deportistas (Brancaccio, et al., 2007). Sin embargo se conoce que estos cambios tienen un comportamiento individual. (Vincent et al., 1997)

En el presente estudio, la CPK se correlacionó únicamente con las variables de tiempo de vuelo (TV) y tiempo a la fuerza pico (TTPF) sin asociación con los cambios de la función neuromuscular (FNM) post ejercicio. Sin embargo se pueden correlacionar con los efectos del mayor esfuerzo excéntrico que realizan los individuos los cuales mostraron mayores cambios y niveles de CPK. Dichos resultados han sido reportados de manera controversial en la literatura (McLellan, et al., 2011). Es necesario realizar investigaciones especialmente con atletas de deportes explosivos para determinar si existen correlaciones de mejor forma con el aumento de la CPK.

El modelo experimental de este estudio demuestra que el acumulo energético excéntrico prepara activamente a los músculos para un estiramiento de carga y posteriormente utilizar dicha energía en la fase concéntrica del salto a través del ciclo estiramiento acortamiento (SSC) (Komi, et al., 1978). De esta manera el óptimo aprovechamiento de la energía elástica excéntrica influiría en el desempeño de las variables de altura del salto, pico de potencia, TV: TC y tiempo de vuelo. Lo anterior demuestra un menor desempeño del tiempo del vuelo durante el salto contra movimiento con relación a una menor acumulación de

energía elástica en la fase excéntrica y un mayor requerimiento de la contracción muscular durante el salto CMJ.

En cuanto a los valores registrados en la relación TV: TC, (Tiempo de vuelo y tiempo de contracción) están influenciados por los sistemas neural y hormonal, los cuales expresan valores aumentados en la relación (TV: TC) post test (Cormack et al, 2008) (Twist, et al., 2012) en deportistas de resistencia sin diferencias significativas en el presente estudio.

18. CONCLUSIONES

El presente estudio se perfila como una de las primeras aproximaciones que reporta la monitorización de la fatiga neuromuscular en deportistas de resistencia, mediante el análisis de la variable bioquímica (CPK) y las variables del salto contra movimiento (CMJ) evaluadas en plataforma de fuerza. La prueba de salto CMJ es una herramienta de monitoreo de la fatiga neuromuscular de gran utilidad en deportistas de rendimiento.

No se encontraron diferencias significativas dentro del análisis de las variables pre y post test de fatiga en los deportistas. Se destaca la diferencia significativa en las variables de pico de potencia ($p=0,017$) y el tiempo de contracción ($p=0,036$) lo que genera un aspecto relevante al determinar dichas variables como indicadores de FNM teniendo una gran importancia en la valoración del desempeño del CMJ, debido a que el deportista acumula o mantiene una fatiga residual que parece ser un aspecto importante en el proceso de adaptación a la carga.

Existe una correlación directa de la CPK y las variables de (^) tiempo a la fuerza pico y (^) tiempo de vuelo, registradas en la valoración de la fatiga neuromuscular del deportista. Las diferencias significativas encontradas infieren que las variables de tiempo de vuelo y tiempo a la fuerza pico se ven afectadas en mayor proporción, debido al aumento del daño o micro lesión muscular.

La relación TV: TC tiene una importancia dentro de la monitorización y determinación del estado de fatiga neuromuscular del deportista, ya que se relaciona con el pico de potencia, el tiempo total de contracción del salto, la duración de las fases excéntrica y concéntrica y el tiempo de vuelo. En el caso de

los deportistas de resistencia, al parecer el tiempo de contracción es más sensible a la fatiga neuromuscular.

Se observa un comportamiento diferencial y particular de la función neuromuscular en el desempeño del salto CMJ en los deportistas de resistencia, estimando una excitación aguda residual del sistema neuronal y muscular posterior a la ejecución de algún tipo de ejercicio. Lo anterior se puede inferir como un estado de potenciación pos activación (PAP).

19. RECOMENDACIONES

Se requieren futuras investigaciones en donde se establezca una mayor muestra poblacional de deportistas aplicando diferentes protocolos de fatiga especialmente con atletas de deportes explosivos para determinar si existen correlaciones de mejor forma en cuanto a la fuerza explosiva, duración excéntrica, duración concéntrica, duración total del salto (CMJ), PAP y CPK para determinar mayores diferencias entre las variables pre y post test.

20. LIMITACIONES

La disponibilidad en tiempo para la aplicación de las pruebas fue escasa debido a las actividades de entrenamiento y competencia de los deportistas para el desempeño investigativo.

En algunos casos los deportistas son incrédulos en cuanto a la obtención de beneficios por participar en el estudio.

Anexo: Consentimiento informado

VARIABLES BIOQUÍMICAS Y DEL DESEMPEÑO DEL SALTO CONTRAMOVIMIENTO PARA MONITORIZAR LA FATIGA NEUROMUSCULAR EN DEPORTISTAS DE RESISTENCIA

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Investigador: FT. Cristian Andrés Yáñez Constante

Coinvestigador: MD. Mauricio Serrato Roa

Maestría en Fisiología

INTRODUCCION

Este documento ha sido elaborado conforme a las previsiones contenidas en la Ley 23 de febrero 18 de 1.981 "Por la cual se dictan normas en materia de ética médica" y la Resolución 13437 de 1.991 del Ministerio de salud, por la cual se adopta el Decálogo de Derechos de los Pacientes aprobado por la Asociación médica Mundial en Lisboa, 1.981.

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La fatiga neuromuscular “aparece durante una competición que posee una o más condiciones orgánicas y funcionales de agotamiento. El concepto puede ser definido como la incapacidad para mantener la fuerza o potencia requerida durante el esfuerzo. Se determina esencialmente por un fallo en la capacidad contráctil del músculo” (Dal Monte, 2002)

Con este proyecto se propone un protocolo de valoración de la fuerza en deportistas de elite, con el objetivo de cuantificar el grado de fatiga neuromuscular, la cual se relaciona con el nivel de desempeño físico, así como también teniendo un punto de clasificación de fatiga y su relación con el riesgo de lesiones, el cual influye en el rendimiento integral del individuo.

La propuesta radica en dar a conocer el nivel de fatiga neuromuscular en deportistas de alto rendimiento a través de la aplicación del protocolo de salto contra movimiento utilizando plataforma de fuerza, fundamentados desde las fuentes bibliográficas. De esta forma la propuesta de evaluación de fatiga neuromuscular podrá ser una herramienta diagnóstica útil dentro del deporte de alto rendimiento y su relación con el grupo interdisciplinario deportivo. Se realizará una investigación cuantitativa de tipo experimental, con un grupo de intervención, que permita dar los resultados del proceso de estudio. Dichos resultados de la investigación permitirán obtener una herramienta de valoración en deportistas manifestando su validez dentro del control deportivo.

CONSENTIMIENTO INFORMADO

ATLETA

Nombre: _____ C.C. _____

He leído la información que ha sido explicada en cuanto al consentimiento. He tenido la oportunidad de hacer preguntas sobre la intervención a realizar. Firmando abajo consiento que se me apliquen las pruebas que se me han explicado de forma suficiente y comprensible.

Entiendo que tengo el derecho de rehusar parte o todo el examen en cualquier momento. Entiendo el procedimiento a seguir y consiento en ser tratado por un fisioterapeuta.

Declaro no encontrarme en ningún de los casos de las contraindicaciones especificadas en este documento.

Declaro haber facilitado de manera leal y verdadera los datos sobre estado físico y salud de mi persona que pudiera afectar las pruebas que se me van a realizar.

Autorizo mi participación en la investigación, con pleno conocimiento de la naturaleza de los procedimientos, beneficios y riesgos a los cuales seré sometido, con la capacidad de libre elección y sin coacción alguna.

Firma: _____

Testigo

Testigo

Nombre: _____ Nombre: _____
Dirección: _____ Dirección: _____

FISIOTERAPEUTA Investigador

Nombre: **Cristian Andrés Yánez Constante**, identificada con CC 12747652 de Pasto; estudiante de la Maestría en Fisiología de la Universidad Nacional de Colombia. Declaro haber facilitado al atleta y/o persona autorizada, toda la información necesaria para la realización de la intervención y pruebas explicitadas en el presente documento y declaro haber confirmado, inmediatamente antes de la aplicación de la técnica, que el atleta no incurre en ninguno de los casos de contraindicación relacionados anteriormente, así como haber tomado todas las precauciones necesarias para que la aplicación de las pruebas sea correcta y en condiciones de salud óptima.

Firma: _____

21. Bibliografía

Abbiss C, Laursen P. (2005). Models to Explain Fatigue during Prolonged Endurance Cycling. *Sports Medicine*. 35 (10): 865-898

Allen D, Lamb GD, Westerblad H. (2008). Skeletal Muscle Fatigue: cellular mechanisms. *Physiological Reviews* Published. 88, 287–332.

Allen D, Westerblad H. (2001). Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue. *Journal of Physiology*. 536.3, pp.657–665

Argus CK, Gill ND, Keogh JW, Mcguigan MR, Hopkins WG. (2012). Effects of two contrast training programs on jump performance in rugby union players during a competition phase. *International journal of sports physiology and performance*. March. 7(1):68-75.

Ascensão, A.; Magalhães, J.; Oliveira, J.; Duarte, J.; Soares, J. (2003). Fisiología de la fatiga muscular. Delimitación conceptual, modelos de estudio de los mecanismos de fatiga de origen central y periférica. *Revista Portuguesa de ciencias del deporte*. Vol. 3, n.1, p.108-123.

Avela J, Kyröläinen H, Komi PV, Rama D. (1999). Reduced reflex sensitivity persists several days after long lasting stretch shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology* Published 1 April Vol. 86 no. 4, 1292-1300

Bandy WD, Lovelace Chandler V, McKittrick Bandy B. (1990). Adaptations of skeletal muscle to resistance training. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*; 12: 248-55

Bennett M, Best TM, Babul S, Taunton J, Lepawsky M. (2005). Hyperbaric oxygen therapy for delayed onset muscle soreness and closed soft tissue injury. *Cochrane Database Systematic Reviews*. Oct 19:(4)

Bienfait, M. (2001). Bases fisiológicas de la terapia manual y la osteopatía. Ed. Paidotribo. 2001. Barcelona.

Bigland Ritchie B. (1984). Muscle fatigue and the influence of changing neural drive. Clinics in chest medicine. Mar; 5(1):21-34.

Billat Veronique. (2002). Fisiología y metodología del Entrenamiento: de la teoría a la práctica. Editorial Paidotribo. Barcelona.

Bosco C, Komi PV (1979). Mechanical characteristics and fiber composition of human leg extensor muscles. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. 41:275–284.

Bosco C, Luhtanen P, Komi PV. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. 50(2):273-82.

Bosco C. (1991) Aspectos fisiológicos de la preparación física del futbolista. Barcelona: Paidotribo.

Bosco C. (1994). La valoración de la fuerza con el test de Bosco. Barcelona: Paidotribo.

Boyas S, Guével A. (2011). Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. 88 – 108

Boullosa D, Tuimil J, Alegre L, Iglesias E, Lusquiños F. (2011). Concurrent Fatigue and Potentiation in Endurance Athletes. International Journal of Sports Physiology and Performance. 6, 82-93.

Brancaccio P, Maffulli N, Politano L, Lippi G, Limongelli FM. (2011). Persistent Hyperckemia in Athletes. Muscles, ligaments and tendons journal. 30; 1(1):31-5.

Brancaccio P, Lippi G, Maffulli N. (2010). Biochemical markers of muscular damage. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*. 48 (6):757-67.

Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM. (2007). Creatine kinase monitoring in sport medicine. *British medical bulletin*. 81 and 82: 209-230.

Brum PC, Forjaz CLM, Tinucci T, Negrão CE. (2004). Adaptaciones agudas y crónicas del ejercicio sobre el sistema cardiovascular. *Revista Paulista de Educación Física*. 18:21-31.

Burke R. (1974). The correlation of physiological properties with histochemical characteristics in single muscle units. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 228: 145-159.

Burke R, Levine D, Salcman M, Tsairis P. (1974). Motor units in cat soleus muscle: Physiological, histochemical and morphological characteristics. *J. Physiol. (Lond.)* 238: 503-514).

Burke R. (1981). Motor units: anatomy, physiology and functional organization. J.M. Brookhart and V.B. Mountcastle (Eds) In: *Handbook of Physiology. The Nervous System. Motor Control*. Bethesda, MD: American Physiological Society, sect. 1, vol. 2, part 1, chapt. 10, pp. 345-422.

Byrne C, Eston R. (2002). The effect of exercise-induced muscle damage on isometric and dynamic knee extensor strength and vertical jump performance. *Journal of sports sciences*. 2002. (20), 417-425.

Cáceres, R. Á. (1994). *Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS: aplicación a las ciencias de la salud*. Ediciones Díaz de Santos

Cavagna GA, Dusman B, Margaria R (1968). Positive work done by a previously stretched muscle. *J Appl Physiol* 24:21 32

Chaitow L, DeLany J. (2007). *Aplicación clínica de las Técnicas Neuromusculares. Extremidades Inferiores. Volumen 2*. Editorial Paidotribo, Enero - 600 páginas.

Chicharro J, Fernández A. (2006). Fisiología del ejercicio. 3ª ed. Madrid: España, Editorial Médica Panamericana.

Cormack S, Mooney M, Morgan W, McGuigan MR. (2013). Influence of Neuromuscular Fatigue on Accelerometer Load in Elite Australian Football Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 8, 373-378.

Cormack SJ, Newton RU, McGuigan MR. (2008a). Neuromuscular and endocrine responses of elite players to an Australian Rules Football match. *Int J Sports Physiol Perform.* ;3(3):359–374.

Cormack SJ, Newton RU, McGuigan MR, Doyle TL. (2008b) Reliability of measures obtained during single and repeated countermovement jumps. *Int J Sports Physiol Perform.* 3(2):131–144.

Cormie P, McBride JM, McCaulley GO. (2009). Power time, force time, and velocity time curve analysis of the countermovement jump: impact of training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 23(1): 177–186.

Costill DL, Gollnick PD, Jansson ED, Saltin B, Stein EM. (1973). Glycogen depletion pattern in human muscle fibres during distance running. *Acta Physiologica Scandinavica*. 89(3):374-83

Coutts AJ, Slattery KM, Wallace LK. (2007). Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes. *J Sci Med Sport*. 10(6):372–381.

Dal Monte A, Faina M, Mirri G. (2002). Fatigue and sport. *Functional Neurology*. 17 (1), 7-10.

Damasceno MV, Lima Silva AE, Pasqua LA, Tricoli V, Duarte M, Bishop DJ, Bertuzzi R. (2015). Effects of resistance training on neuromuscular

characteristics and pacing during 10 km running time trial. *European Journal of Applied Physiology*. Jul, 115(7): 1513-22

Deschenes MR, Brewer RE, Bush JA, McCoy RW, Volek JS, Kraemer WJ. (2000). Neuromuscular disturbance outlasts other symptoms of exercise induced muscle damage. *Journal of the Neurological Sciences*. March 15; 174 (2):92-9.

Duffield R, Murphy A, Kellett A, Reid M. (2014). Recovery from repeated on court tennis sessions: combining cold water immersion, compression, and sleep recovery interventions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Mar: 9 (2):273-82.

Edwards R, Hill D, Jones D, Merton P (1977a). Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise. *Journal of Physiology*. (Lond) 272(3): 769-778.

Edwards R, Young A, Hosking G, Jones D, (1977b). Human skeletal muscle function: description of test and normal values. *Clinical science and molecular medicine*. 52:283-290.

Edwards, R. H. T. (1983). Biochemical bases of fatigue in exercise performance: catastrophe theory of muscular fatigue. *Biochemistry of Exercise*. Champaign, Il. Human Kinetics. pp. 3-28.

Esteve Lanao J, Rhea MR, Fleck SJ, Lucia A. (2008). Running specific, Periodized Strength Training Attenuates loss of Stride Length during Intense Endurance Running. Jul; 22(4):1176-83. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Farrell P, Joyner M, Caiozzo V. (2012). *ACSM's Advanced Exercise Physiology*. 2th ed. Lippincott Williams & Wilkins.

Fitts RH. (1994). Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiological Reviews*. Jan; 74(1):49-94.

Flanagan EP, Comyns TM. (2008). The Use of Contact Time and the Reactive Strength Index to Optimize Fast Stretch Shortening Cycle Training. *Strength and Conditioning Journal*; 30(5):32-38.

Gandevia SC. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 81(4):1725-89.

García J, Jiménez F, Arnaud M, Ramírez Y, Lino L. (2011). Introducción a la metodología de la investigación en ciencias de la Salud. Mc Graw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

García V, Mariano. (2007). Resistencia y Entrenamiento: Una metodología Práctica. Editorial Paidotribo. 1ª Edición. España.

Gathercole R, Sporer B, Stellingwerff T, Sleivert G. (2015) Alternative counter movement jump analysis to quantify acute neuromuscular fatigue. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Jan; 10(1):84-92

Gathercole R, Stellingwerff T, Sporer BC. (2015b). Effect of acute fatigue and training adaptation on countermovement jump performance in elite snowboard cross athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Jan. 29 (1):37-46.

González Badillo JJ, Gorostiaga Ayestarán E. (1997). Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. 2ª edición. Barcelona: España, INDE publicaciones.

Gonzalez B JJ, Gorostiaga E. (1995). Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Barcelona: España, INDE publicaciones.

Gonzalez B JJ, Gorostiaga E. (2002). Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Barcelona: España, Editorial Inde.

Gonzalez B JJ, Rivas JR. (2002). Bases de la Programación del Entrenamiento de Fuerza. Barcelona: España, Editorial Inde.

Gómez Campos, R, Cossio Bolaños, M.A, Brousett Minaya, M, Hochmuller Fogaca, RT. (2010). Mecanismos implicados en la fatiga aguda. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. vol. 10 (40) pp. 537-555.

Green, H. (1997). Mechanisms of muscle fatigue in intense exercise. Journal of Sports Sciences. 15 247-256.

Guyton y Hall. (2011). Tratado de fisiología médica. Elsevier Saunders. 12 edición. 1092 páginas.

Halson SL. (2014). Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. Sports Medicine. Vol 44: S139–S147

Hara M, Shibayama A, Takeshita D, Fukashiro S. (2006). The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping. Journal of Biomechanics. 39 (13):2503-11.

Hargreaves, M. (2005). Metabolic factors in fatigue. Sports science, Exchange 98. Volume 18, number 3.

Hawley JA. (2002). Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology. March 29 (3):218 - 22.

Hawley, JA, Stepto, N. (2001). Adaptations to Training in Endurance Cyclists. Implications for Performance. Sports Med; 31 (7): 511-520.

Henneman E, Olson CB. (1965). Relations between structure and function in the design of skeletal muscles. Journal of Neurophysiology. 28: 581–598.

Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. Journal of Neurophysiology. 28: 560–580.

Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. (1965). Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. Journal of Neurophysiology. 28: 599–620.

Hoffman JR, Nusse V, Kang J. (2003). The effect of an intercollegiate soccer game on maximal power performance. *Canadian journal of Applied Physiology*. Dec 28(6):807-17

Kenney WL, Willmore JH, Costill DL. (2012). *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Médica Panamericana: Human Kinetics.

Kjaer M. (2004). Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading. *Physiol Rev*; 84(2):649-98.

Komi PV. (1992a). Stretch-shortening cycle. In: *Strength and Power in Sports*. P.V. Komi, ed. Oxford: Blackwell. pp. 169–179.

Komi PV. (1986). The stretch shortening cycle and human power output. In: *Human Muscle Power*. N. L. Jones, N. McCartney, and A. J. Mc Comas, eds. Champaign, IL: Human Kinetics. pp. 27–39.

Komi PV. (1992b). Stretch shortening cycle. In: *Strength and Power in Sports*. P.V. Komi, ed. Oxford: Blackwell. pp. 169–179

Komi PV. (2000). Stretch shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *J Biomech* 33:1197– 1206.

Komi P, Bosco C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and science in sports*. Vol 10 Numero 4, pp. 261-265.

Liddell EGT, Sherrington CS. (1925). Recruitment and some other factors of reflex inhibition. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*. 97:488-518.

Linthorne N. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *American Journal of Physics*. Volume 69, edición 1

Mackala K, Stodółka J, Siemiński A, Coh M. (2013). Biomechanical analysis of squat jump and countermovement jump from varying starting positions. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Oct;27(10):2650-61

McClymont D. (2008). The use of the reactive strength index as an indicator of plyometric training conditions. In: Reilly T, Cabri J, and Araujo D, eds. *Science and Football V: The Proceedings of the Fifth World Congress on Sports Science and Football*. Lisbon, Portugal, 11–15 April 2003. New York: Routledge. pp. 408–416.

McLellan CP, Lovell DI, Gass GC. (2011). Markers of postmatch fatigue in professional Rugby League players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*. Apr; 25(4):1030-9

McLean BD, Coutts AJ, Kelly V, McGuigan MR, Cormack SJ. (2010a). Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between match microcycles in professional rugby league players. *International journal of sports physiology and performance*. Sep; 5(3):367-83.

Menzel H, Chagas M, Szmuchrowski L, Araujo S, De Andradre A, Resende F, De Jesus Moraleida F. (2013). Analysis of lower limb asymmetries by isokinetic and vertical jump tests in soccer players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*.

Merí A. (2005). *Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte*. Barcelona: España, Editorial Médica Panamericana S.A.

Mikel, I. (2008). *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Madrid: España, Editorial Médica Panamericana S.A.

Mirella R. (2011). *Las nuevas metodologías del entrenamiento de la fuerza, la resistencia, la velocidad y la flexibilidad*. 2 ed. Barcelona: España. Paidotribo.

- Mohr M, Bangsbo J, Krstrup P. (2006). Demandas físicas y energéticas del entrenamiento y de la competencia en el jugador de fútbol de élite. *Journal of Sports Sciences*. 24(07):665-674.
- Molina, J.J, Sagastume R, Fano, D. (1994). Estudio de los factores musculares implicados en la saltabilidad de jóvenes jugadores de Voleibol. *Kirola Ikertuz*, N°8, Otoño, 24 -45.
- Mooney M, Cormack S, O'brien B, Morgan W, Mcguigan M. (2013). Impact of Neuromuscular Fatigue on Match Exercise Intensity and Performance in elite Australian Football. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Mougios V. (2007). Reference intervals for serum creatine kinase in athletes. *British Journal of Sports Medicine*. 41(10):674-8.
- Nedelec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G. (2012). Recovery in soccer: part I - post-match fatigue and time course of recovery. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. Dec 1;42(12):997-1015.
- Nedelec M, McCall A, Carling C, Legall F, Berthoin S, Dupont G. (2014). The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Jun;28(6):1517-23.
- Noakes TD. (2000). Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 10,123-145.
- Norman RW, Komi PV. (1979). Electromyographic delay in skeletal muscle under normal movement conditions. *Acta Physiologica Scandinavica*. 106, 241-8.
- Nybo L, Dalsgaard M, Steensberg A, Moller K, Secher N. (2005). Cerebral ammonia uptake and accumulation during prolonged exercise in humans. *J Physiol*. v. 563, p. 285–290.

Olivier G, Millet GP. (2008). Neuromuscular Fatigue in Racquet Sports. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*. Volume 20, No. 1. 161-173

Ono M, Miyashita M, Asami T (1976). Inhibitory effect of long distance running training on the vertical jump and other performances among aged males. In: Komi PV, editor. *Biomechanics v-b*. Baltimore (MD): University Park Press: 94-100

Orrego, M. L., & Monsalve, D. C. (2006). Laboratorio clínico y ejercicio. F. Marino, O. Cardona, & LE Contreras, *Medicina del deporte* (págs. 93-94). Medellín: Corporación para Investigaciones Biológicas.

Ospina C, (2015). Efecto de la neuroestimulación vascular sobre el músculo liso en la recuperación post ejercicio en atletas. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Ouerghi N, Khammassi M, Boukorraa S, Feki M, Kaabachi N, Bouassida A. (2014). Effects of a high intensity intermittent training program on aerobic capacity and lipid profile in trained subjects. *Open Access Journal of Sports Medicine*. 5: 243 - 248.

Quagliarella L, Sasanelli N, Belgiovine G, Accettura D, Notarnicola A, Moretti B. (2011). Evaluation of counter movement jump parameters in young male soccer players. *Journal of applied biomaterials & biomechanics*. Vol. 9 No.1, 40-46.

Rainoldi A, Falla D, Mellor R, Bennell K, Hodges P. (2008). Myoelectric manifestations of fatigue in vastus lateralis, medialis obliquus and medialis longus muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 18:1032-7.

Richter A, Rappale S, Kurz G, Schwameder H. (2012). Countermovement jump in performance diagnostics: Use of the correct jumping technique. *European Journal of Sport Science*, May; 12(3): 231_237

Rodríguez García PL. (2008). Ejercicio físico en salas de acondicionamiento muscular: Bases científico médicas para una práctica segura y saludable. Buenos Aires; Madrid: Médica Panamericana.

Ronglan LT, Raastad T, Borgesen A. (2006). Neuromuscular fatigue and recovery in elite female handball players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. Aug; 16(4):267-73.

Schmitz RJ, Cone JC, Copple TJ, Henson RA, Shultz SJ. (2014). Lower extremity biomechanics and maintenance of vertical jump height during prolonged intermittent exercise. *Journal of Sport Rehabilitation* Nov. 23(4):319-29.

Serrato, M. (2008). *Medicina del deporte*. Bogotá: Colombia. Editorial del Rosario.

Serrato M, Sánchez L, Cohen D. (2015). *Lineamientos en ciencias del deporte. Medicina. Modulo 3: medición de la fuerza, potencia muscular*. Departamento Administrativo del Deporte, la Recreación, la Actividad Física y el Aprovechamiento del Tiempo Libre. Coldeportes. Bogotá.

Sheppard JM, Cormack S, Taylor KL, McGuigan MR, Newton RU. (2008). Assessing the force velocity characteristics of the leg extensors in well-trained athletes: the incremental load power profile. *J Strength Cond Res*. 22(4):1320–1326.

Snieckus A, Kamandulis S, Venckunas T, Brazaitis M, Volungevicius G, Skurvydas A. (2013). Concentrically trained cyclists are not more susceptible to eccentric exercise-induced muscle damage than are stretch-shortening exercise trained runners. *European Journal of Applied Physiology*. Mar; 113(3):621-8.

Taylor KL, Chapman, DW, Cronin, JB, Newton, MJ, Gill N. (2012). Fatigue monitoring in high performance sport: a survey of current trends. *Journal of Australian Strength & Conditioning*. 20 (1)12-23.

Taylor KL, Cronin J, Gill ND, Chapman DW, Sheppard J. (2010). Sources of variability in isoinertial jump assessments. *Int J Sports Physiol Perform*. 5(4):546–558.

Terrados N, Mora Rodríguez R, Padilla S. (2004). *La Recuperación de la Fatiga del Deportista*. Madrid, España. Editorial Gymnos.

Thibodeau GA, Patton KT. (2007). *Anatomía y fisiología*. 6ª ed. Madrid: España. Elsevier.

Thibodeau GA, Patton KT. (2012). *Estructura y función del cuerpo humano*. 14ª ed. Madrid: España. Elsevier.

Thorlund JB, Michalsik LB, Madsen K, Aagaard P. (2008). Acute fatigue induced changes in muscle mechanical properties and neuromuscular activity in elite handball players following a handball match. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 18 (4):462-72.

Thortensson A, Sjodin B, Tesch P, Karlsson J. (1977). Actomyosin ATPase, CPK, and LDH in human fast and slow twitch fibers. *Acta Physiologica Scandinavica*.

Twist C, Eston R. (2005). The effects of exercise induced muscle damage on maximal intensity intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*. Volume 94, No. 5 - 6. Pags. 652-658

Twist C, Highton J. (2013). Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 8: 467-474.

- Twist C, Waldron M, Highton J, Burt D, Daniels M. (2012). Neuromuscular, biochemical and perceptual post-match fatigue in professional rugby league forwards and backs. *Journal of Sports Sciences*. 30(4):359-67.
- Vandewalle H, Pérès G, Sourabié B, Stouvenel O, Monod H. (1989). Force-velocity relationship and maximal anaerobic power during cranking exercise in young swimmers. *International Journal of Sports Medicine*. Dec; 10 (6):439-45.
- Van Ingen Schenau GJ, Bobbert MF, De Hann A (1997). Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch shortening cycle? *Appl Biomech* 13: 389 – 415
- Van Mechelen W. (1992). Running Injuries. A review of the epidemiological literature. *Sports Med*. 1992. Nov: 14 (5):320-35
- Vanmeerhaeghe A, Rodriguez D. (2013). Análisis de los factores de riesgo neuromusculares de las lesiones deportivas. *Apunts Medicina del 'Esport*. 48 (179): 109-120
- Verkhoshansky Y. (2007). The training system in middle distance running. *Journal of Sport Strength Training Methodology*. N°3. December.
- Vincent HK, Vincent KR (1997). The effect of training status on the serum creatine kinase response, soreness and muscle function following resistance exercise. *Int J Sports Med*, 18, 431–437.
- Walshe AD, Wilson GJ, Eterna GJC. (1998). Stretch shorten cycle compared with isometric preload: contributions to enhanced muscular performance. *J Appl Physiol* 84: 97 – 106.
- Warren, G. L., Lowe, D. A, Armstrong, D. B. (1999). Measurement Tools Used in the study of eccentric contraction induced injury. *Sports Medicine*. 27(1), 43-59.
- Westerblad H, Allen DG. (2002). Recent advances in the understanding of skeletal muscle fatigue. *Current Opinion in Rheumatology*. 14(6):648-52.

Willmore JH, Costill DL. (2007). *Physiology of Effort and Sport*. 5th ed. Champaign, Illinois: Human Kinetics. 2007.

Yanci J, Los Arcos A, Cámara J. (2014). Physical characteristics and unilateral differences of vertical and horizontal jump in elite soccer players. *Journal of Sport and Health Research*. 6(3):217- 226.

Yuan Y, So R; Wong S, Chan K. (2002). Ammonia threshold comparison to lactate threshold, correlation to other physiological parameters and response to training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. v. 12, p. 358-364

Zintl, F. (1991). *Entrenamiento de la Resistencia*. Martínez Roca. Barcelona.