



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN SALUD INTEGRAL Y MOVIMIENTO HUMANO  
FACULTAD EN CIENCIAS DE LA SALUD  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MOVIMIENTO HUMANO Y CALIDAD DE  
VIDA**

**EFFECTOS SOBRE LA FUNCIÓN NEUROMUSCULAR DE  
CORRER UN MARATÓN EN CONDICIONES DE CALOR Y  
HUMEDAD EXTREMOS EN PARTICIPANTES AFICIONADOS:  
ABORDAJE TENSIOMIOGRÁFICO Y CINEMÁTICO**

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador de Tesis de Posgrado en Salud Integral y Movimiento Humano, para optar por el título de *Magister Scientiae*

**Daniel Francisco Rojas Valverde**

Campus Presbítero Benjamín Núñez, Heredia, Costa Rica

Año 2016

**EFFECTOS SOBRE LA FUNCIÓN NEUROMUSCULAR DE  
CORRER UN MARATÓN EN CONDICIONES DE CALOR Y  
HUMEDAD EXTREMOS EN PARTICIPANTES AFICIONADOS:  
ABORDAJE TENSIOMIOGRÁFICO Y CINEMÁTICO**

NEUROMUSCULAR FUNCTION EFFECTS OF EXTREME HEAT AND HUMID CONDITIONS  
MARATHON RUNNING ON AMATEURS: A TENSIO MYOGRAPIC AND KINEMATIC  
APPROACH

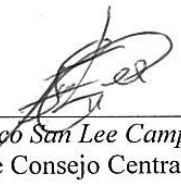
Daniel Francisco Rojas Valverde

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador de Tesis de Posgrado en Salud Integral y Movimiento Humano, para optar por el título de *Magíster Scientiae*. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional.

Heredia, Costa Rica  
2016

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador de Tesis de Posgrado en Salud Integral y Movimiento Humano, para optar por el título de *Magister Scientiae*. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional.

Miembros del Tribunal Examinador



---

*Francisco San Lee Campos, Dr.*  
Representante Consejo Central de Posgrado



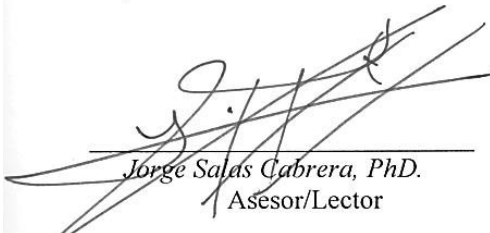
---

*Braulio Sánchez Ureña, MSc.*  
Coordinador de la Maestría en Salud Integral  
y Movimiento Humano



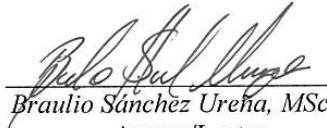
---

*Randall Gutiérrez Vargas, MSc.*  
Tutor



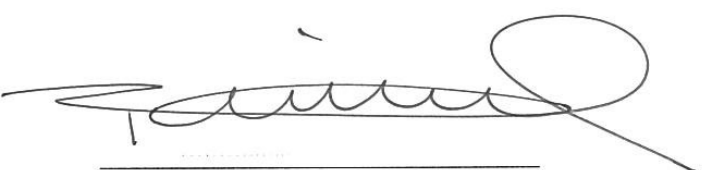
---

*Jorge Salas Cabrera, PhD.*  
Asesor/Lector



---

*Braulio Sánchez Ureña, MSc.*  
Asesor/Lector



---

*Daniel Francisco Rojas Valverde*  
Sustentante

Heredia, Costa Rica  
2016

III

III

## **Dedicatoria**

Este final del proceso solo puede ser dedicado a las personas que me inculcaron los valores del esfuerzo, la dedicación, la superación, el trabajo, la disciplina, el amor y la consciencia social y natural. Las mismas que me enseñaron a siempre querer más y las que me incentivaron a dar lo mejor de mí en todo lo que hiciera y a nunca dejar de soñar.

A mis padres, Sonia Valverde Arce y Marvin Rojas Alfaro, de quienes recibí la mejor de las herencias, la curiosidad. A mis abuelos, Oscar Milton Valverde Ramírez y Sonia Arce Chacón quienes me transmitieron una pasión inigualable por la enseñanza. Todos son mis ejemplos a seguir, les agradezco el hábito del ejercicio y la salud.

A mis familiares por siempre darme una palabra de apoyo en todas las aventuras que emprendí durante este proceso.

A Carolina Villa Víquez, quién fue un apoyo indiscutible, gracias a ella por ser un pilar fundamental al levantar los cimientos de este proyecto.

A todas aquellas personas que me incentivaron a finalizar con éxito esta aventura.

A Pity por ser mi compañera incondicional todos esos días y noches de lectura, investigación y sueño.

## **Agradecimiento**

El éxito es subjetivo y resultado de múltiples esfuerzos no solo individuales sino de las personas que nos rodean. Para ello, no hay mejor incentivo que vivir en un contexto que sea tan exigente que nos rete a ser mejor cada día, por eso agradezco profundamente a todas las personas e instituciones que con creces lograron motivarme.

Agradezco a mi Universidad Nacional de Costa Rica, la cual me brinda la oportunidad de crecer en experiencias y conocimiento, gracias por exigirme que todo lo que haga debiera tener un impacto en la naturaleza y la sociedad, que debo ser responsable conmigo y con mi entorno.

Agradezco a mi país por darme la oportunidad de estudiar de una forma accesible y a bajo costo, por brindar el espacio para que el pueblo sea crítico y ciudadano, gracias por darme el privilegio de nacer en tan maravillosa tierra.

Agradezco a mis docentes durante todo el ciclo universitario, porque se encargaron de hacer de esta, una experiencia inolvidable, especialmente debo agradecer a Randall Gutiérrez Vargas por darme la oportunidad de crecer profesionalmente en nuestra *alma mater* y por creer en mi capacidad, a Jorge Salas Cabrera y a Braulio Sánchez Ureña por brindar su tiempo, dedicación y consejo sin ningún interés para que este trabajo haya sido un éxito.

Agradezco al equipo de profesionales quienes dieron un aporte para que este proyecto fuera posible, a Manuel González Cordero, a Alejandro Rodríguez Montero, a Dennis Vargas, a Berenice Villanueva Del Valle, y al estudiantado de bachillerato de Enseñanza en Educación Física, Deporte y Recreación y bachillerato Promoción de la Salud Física, quienes ofrecieron su trabajo desinteresado.

Agradezco en especial a las personas participantes del estudio quienes cumplieron con éxito su meta, correr un maratón de gran dificultad, gracias por exponer su cuerpo a la ciencia.

Gracias infinitas a esa energía que nos regala la naturaleza y la libertad de vivirla.

## **Resumen**

*Objetivo:* Describir los efectos neuromusculares que conlleva la participación de corredores aficionados en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico y cinemático

### *Metodología*

Se realizaron mediciones tensiomiográficas y cinemáticas a 17 corredores aficionados, de los cuales 10 eran hombres y 7 mujeres. Las evaluaciones se realizaron en 5 sesiones diferentes, 144 horas previas al evento, durante el mismo y 360 horas posteriores (LB) a un maratón en condiciones extremas de calor y humedad.

### *Resultados*

Hubo múltiples resultados en los cuales se correlacionan variables cinemáticas con el comportamiento tensiomiográfico, este último con variables que de antemano se expresan daño muscular como lo es el CPK y esta variable biomarcadora también tienen comportamientos particulares que se pueden correlacionar con variables cinemáticas. Ejemplos de ellos son los siguientes resultados. Existe una relación significativa y positiva entre el porcentaje de cambio al considerar las líneas base y las evaluaciones 24 horas posteriores del CPK como marcador de daño muscular y los datos tensiomiográficos de RF en el hemisferio dominante. Existen múltiples correlaciones que indican que a mayor velocidad de carrera mayor cantidad de fuerzas g experimenta el cuerpo. A su vez se encontraron diferencias en la magnitud del impacto del cuerpo durante el evento entre hombres y mujeres. No existen cambios significativos entre el comportamiento tensiomiográfico de hombres y mujeres 24 horas posteriores al evento.

### *Conclusiones*

En un maratón se ven involucrados múltiples y complejos factores, es muy poco probable que se puedan controlar todos. Desde un punto de vista neuromuscular el cuerpo responde a la maratón de maneras muy diversas dependiendo del sexo, entrenamiento, estructura corporal entre otros. El factor calor provocó que se disminuyera el ritmo de carrera pero no agudizó la fatiga neuromuscular en la población estudiada. Si hubo correlaciones y diferencias significativas en variables que ayudan a explicar el comportamiento del cuerpo posterior a un evento de resistencia, lo que ayudaría a minimizar el impacto sobre la salud y el estado físico de los participantes.

## ÍNDICE

<b>Miembros del Tribunal Examinador.....</b>	<b>III</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>V</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>VI</b>
<b>Listado de Tablas.....</b>	<b>XI</b>
<b>Listado de Figuras.....</b>	<b>XII</b>
<b>Listado de Imágenes.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Listado de Abreviaturas.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Descriptorios.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Capítulo I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento y delimitación del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Justificación.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Objetivo General.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Objetivos Específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo II: MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Antecedentes Maratón.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Condiciones fisiológicas del corredor de maratón.....</b>	<b>12</b>
2.2.1 <i>Consumo de Oxígeno Máximo (<math>VO_{2máx}</math>).....</i>	<i>12</i>
2.2.2 <i>Umbral de Lactato.....</i>	<i>13</i>
2.2.3 <i>Vías de adaptación fisiológica para mejor desempeño.....</i>	<i>14</i>
<b>2.3 Fatiga en maratón.....</b>	<b>15</b>
2.3.1 <i>Marcadores sanguíneos (Creatin Fosfoquinasa [CPK]).....</i>	<i>16</i>
<b>2.4 Entrenamiento y Economía de Carrera.....</b>	<b>17</b>
<b>2.5 Variación del ritmo de carrera durante un maratón.....</b>	<b>18</b>
<b>2.6 Ejercicio en condiciones extremas de calor y humedad.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6 Medición de condiciones ambientales.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 Anatomía/fisiología neuromuscular.....</b>	<b>22</b>
2.7.1 <i>Función neuromuscular.....</i>	<i>23</i>
2.7.2 <i>Bioenergía en la función neuromuscular.....</i>	<i>26</i>
2.7.3 <i>Fibras musculares de contracción lenta.....</i>	<i>26</i>
2.7.4 <i>Rigidez/Tensión muscular.....</i>	<i>28</i>

<b>2.8 Fatiga neuromuscular.....</b>	<b>29</b>
2.8.1 <i>Dolor Muscular de Inicio Retardado.....</i>	31
2.8.2 <i>Métodos de medición neuromuscular.....</i>	33
2.8.2.1 <i>Fuerza.....</i>	33
2.8.2.2 <i>Resistencia muscular.....</i>	34
2.8.2.3 <i>Potencia.....</i>	34
2.8.2.4 <i>Electromiografía.....</i>	34
2.8.2.5 <i>Tensiomiografía.....</i>	35
2.8.2.6 <i>Parámetros obtenidos bajo el método tensiomiográfico.....</i>	38
2.8.2.7 <i>Datos de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular de estudios similares.....</i>	39
2.8.2.8 <i>Desbalances Neuromusculares.....</i>	42
2.8.2.9 <i>Simetrías laterales.....</i>	44
2.8.2.10 <i>Simetrías Funcionales.....</i>	44
<b>Capítulo III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Participantes.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Instrumentos y materiales.....</b>	<b>47</b>
3.2.1 <i>Antropometría.....</i>	47
3.2.2 <i>Función Cardiorrespiratoria.....</i>	48
3.2.3 <i>Variables Cinemáticas.....</i>	49
3.2.4 <i>Índice de Estrés Termal.....</i>	52
3.2.5 <i>Creatin Fosfoquinasa.....</i>	52
3.2.6 <i>Variables neuromusculares / tensiomiografía.....</i>	53
<b>3.3 Procedimiento.....</b>	<b>56</b>
3.3.1 <i>Sesión 1.....</i>	56
3.3.2 <i>Sesiones 2.....</i>	57
3.3.3 <i>Sesión 3.....</i>	57
3.3.4 <i>Sesión 4.....</i>	58
3.3.5 <i>Sesión 5.....</i>	58
<b>3.4. Diseño experimental.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5 Análisis Estadístico.....</b>	<b>59</b>

<b>Capítulo IV: RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>Capítulo V: DISCUSIÓN.....</b>	<b>77</b>
<b>Capítulo VI: CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>Capítulo VII: RECOMENDACIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>101</b>

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores descriptivos de las variables bioquímicos, físicos y fisiológicos, para la caracterización de los participantes.....	61
<b>Tabla 2.</b> Correlaciones de datos cinemáticos y fisiológicos de los participantes del evento de maratón.....	63
<b>Tabla 3.</b> Cantidad de impactos mayores a 2 gravedades sufridos por los participantes durante el maratón.....	64
<b>Tabla 4.</b> Correlación de valores Cinemáticos, CPK y magnitudes de impacto.....	65
<b>Tabla 5.</b> Correlación entre la cantidad de impactos en fuerzas g y el comportamiento del desplazamiento radial muscular del recto femoral a las 24 hrs y 144 hrs posteriores al evento de maratón.....	65-66
<b>Tabla 6.</b> Porcentajes de cambio de valores de CPK y el porcentaje de cambio del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular pre y post maratón.....	67
<b>Tabla 7.</b> Porcentajes de cambio de valores de CPK y valores de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular del hemisferio dominante del recto femoral.....	67-68
<b>Tabla 8.</b> Valores descriptivos relacionados con la tensiomiografía de los músculos recto femoral y vasto medial y comparación entre hemicuerpos dominante y no dominante en los tres momentos de medición.....	69-70
<b>Tabla 9.</b> Comparación por medio de ANOVA de Medidas Repetidas del comportamiento del recto femoral según momento de medición.....	71
<b>Tabla 10.</b> Comparación por medio de ANOVA de Medidas Repetidas del comportamiento del vasto medial según momento de medición.....	72-73
<b>Tabla 11.</b> Volumen de actividad física realizada por los participantes entre la evaluación 24 horas posteriores y 144 horas posterior según disciplina deportiva.....	74
<b>Tabla 12.</b> Comportamiento tensiomiográfico del recto femoral y vasto medial agrupadas según el volumen de actividad realizada posterior al maratón.....	75

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Asimetrías de recto femoral de una participante femenina 24 horas post maratón.....	45
<b>Figura 2.</b> Índice de Estrés Termal del día de carrera y sus variaciones durante la competencia contra los valores límites recomendados por la ACSM (2007), para la realización de ejercicio seguro (Elaboración propia).....	60
<b>Figura 3.</b> Media de la Velocidad de Carrera de los participantes por kilómetro.....	62
<b>Figura 4.</b> Diferencias entre hemisferios dominante y no dominante relacionados al desplazamiento radial muscular del recto femoral en los tres momentos de medición.....	70
<b>Figura 5.</b> Comportamiento tensiomiográfico del recto femoral en tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular según momento de medición.....	72
<b>Figura 6.</b> Comportamiento tensiomiográfico del vasto medial en tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular según momento de medición.....	73
<b>Figura 7.</b> Comportamiento del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular del recto femoral y vasto medial de acuerdo al volumen de actividad física (min) posterior al maratón.....	75-76

## LISTA DE IMÁGENES

<b>Imagen 1.</b> Respuesta muscular de un voleibolista de playa a 110 mA, la cual grafica los valores tensiomiográficos (García-Manso et al., 2010).....	39
<b>Imagen 2.</b> Altimetría del recorrido de la carrera (Fuente: Tamarindo Beach Marathon, 2015).....	47
<b>Imagen 3.</b> Evaluación de absorciometría dual de rayos X .....	48
<b>Imagen 4.</b> Equipo evaluación capacidad aeróbica.....	49
<b>Imagen 5.</b> Colocación del chaleco y monitor cardiaco.....	51
<b>Imagen 6.</b> Equipo para evaluación del estrés termal.....	52
<b>Imagen 7.</b> Analizador bioquímico de CPK.....	53
<b>Imagen 8.</b> Evaluación de VM con Tensiomiografía.....	55

## LISTADO DE ABREVIATURAS

<b>1RM</b>	una repetición máxima
<b>ATP</b>	adenosin trifosfato
<b>BF</b>	bíceps femoral
<b>CC</b>	carga corporal
<b>CMJ</b>	<i>counter movement jump</i>
<b>cms</b>	centímetros
<b>CMV</b>	contracción máxima voluntaria
<b>CoV<sub>vel</sub></b>	coeficiente de variación de la velocidad
<b>CPK</b>	creatin fosfoquinasa
<b>DEXA</b>	absorciometría dual de rayos X
<b>Dm</b>	desplazamiento radial muscular
<b>DOMS / DMIR</b>	dolor muscular de inicio retardado
<b>DS</b>	desviación estándar
<b>EC</b>	economía de carrera
<b>EMG</b>	electromiografía
<b>FT</b>	fibras de contracción rápida
<b>GH</b>	grupo hombres
<b>GM</b>	grupo mujeres
<b>GPS</b>	sistema de posicionamiento global / satelital
<b>HD</b>	hemisferio dominante
<b>HND</b>	hemisferio no dominante
<b>kms</b>	kilómetros
<b>LDH</b>	lactato deshidrogenasa
<b>M</b>	media
<b>mA</b>	mili amperios
<b>mm</b>	milímetros
<b>ms</b>	milisegundos
<b>mts</b>	metros
<b>PA</b>	potencial de acción
<b>RF</b>	recto femoral

**SJ** *squat jump*  
**SNC** sistema nervioso central  
**SNP** sistema nervioso periférico  
**ST** fibras de contracción lenta  
**Tc** tiempo de contracción  
**Td** tiempo de reacción  
**TGBH** índice de estrés termal  
**Ts** tiempo de sustentación  
**Tr** tiempo de relajación  
**TMG** tensiomiografía  
**UA** umbral anaeróbico  
**UL** umbral lactato  
**UN** unión neuromuscular  
**VM** vasto medial  
**VO<sub>2</sub>máx** consumo máximo de oxígeno

## **DESCRIPTORES**

1. Maratón
2. Neuromuscular
3. Calor
4. Humedad
5. Tensiomiografía

# Capítulo I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento y delimitación del problema:

Múltiples estudios han demostrado el riesgo de correr un evento de resistencia por el gran esfuerzo físico que ello implica (El Helou et al, 2012, Costa, Crockford, Moore y Walsh, 2012; Kim et al, 2014, Mohammed y Thomson, 2012). Se han indagado gran cantidad de factores que intervienen en eventos de larga duración y que pueden ir en decremento de la salud (El Helou, Tafflet, Berthelot, Tolaini, Marc, Guillaume, Hauswirth, y Toussaint, 2012; Chevront y Haymes, 2001, Costa, Crockford, Moore y Walsh, 2012; Kim, Shin, Lee, Lee, Shin, Kim, Goh, Kim, Oh, Min, y Yang, 2014, Mohammed y Thomson, 2012). De igual manera se ha estudiado cómo la exposición a condiciones extremas de calor y humedad tiene un impacto adverso en el organismo (Chevront y Haymes, 2001; Kim et al, 2014). Se tiene conocimiento que exponer al cuerpo a grandes esfuerzos durante tiempos prolongados afecta la salud desde múltiples aristas (Fredericson y Misra, 2007; Hanssen et al., 2011; Kyrolainen et al., 2000; Maughan y Miller, 1983; Neilan et al., 2006; Nieman et al., 2002; Rae et al., 2010; Satterthwaite et al., 1996; Siegel, Silverman, y Lopez, 1980; Van Middelkoop, Kolkman, Van Ochten, Bierma-Zeinstra, y Koes, 2008; Warhol, Siegel, Evans, y Silverman, 1985; Yared y Wood, 2009). A pesar de la existencia de los estudios anteriores, en la comunidad científica nacional e internacional no han indagado qué aspectos a nivel neuromuscular podrían modificarse posteriores a un maratón en condiciones extremas de calor y humedad en atletas aficionados. Gracias a ello surge la interrogante: ¿Cuáles son los efectos neuromusculares que conlleva la participación de corredores aficionados en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico y cinemático?

## **1.2 Justificación:**

El desempeño físico es multifactorial y puede verse influenciado por factores genéticos y ambientales tales como temperatura, humedad, radiación, altitud, entre otros. La maratón desde ese punto de vista es un evento sumamente desgastante, y en el cual las condiciones ambientales pueden variar desde el inicio de la misma hasta la llegada a la meta (Costa, Crockford, Moore y Walsh, 2012; El Helou, Tafflet, Berthelot, Tolaini, Marc, Guillaume, Hausswirth, y Toussaint, 2012; Cheuvront y Haymes, 2001; Kim et al., 2014; Mohammed y Thomson, 2012).

Se ha estudiado el efecto fisiológico y bioquímico que la temperatura, la humedad y una prueba de resistencia tal como un maratón, pueden tener sobre el ser humano. A su vez, se han estudiado los riesgos que pueden llegar a generar las interacciones de estas variables y el inminente peligro a la vida de los y las participantes de estas competencias de resistencia, por su naturaleza extrema. (Costa, Crockford, Moore y Walsh, 2012; El Helou et al, 2012; Kim et al, 2014; Mohammed y Thomson, 2012).

Se tiene evidencia de que en eventos de resistencia como el maratón, el efecto del calor, puede generar limitaciones significativas para mantener el cuerpo en estado termorregulatorio adecuado (Cheuvront y Haymes, 2001; Kim et al, 2014). Al respecto, Kim et al. (2014), señalan que una competencia a intensidad moderada/alta como lo es el maratón incrementa los marcadores biológicos y cardíacos que indican lesión neuromuscular. Otras variables como la humedad relativa alta y la oscilación de las temperaturas durante un evento de resistencia suman a la maratón un gran desgaste, pero también peligro, ya que si se suman todos estos factores nos encontramos con una confluencia de causas que pueden incrementar con gran significancia el riesgo de muerte o lesión severa (American College of Sport Medicine, 2007; Sport Medicine Australia, 2008).

La organización Sports Medicine Australia (2008), señala que temperaturas de 26-30 grados Celcius (°C) sumados a una humedad relativa de 60% o más, son calificadas como condiciones de riesgo moderado-alto. Estas son las condiciones alcanzadas con facilidad en un país tropical como es el caso de Costa Ricas, y aumenta cuando se refiere a las costas y horas de la mañana así como en ciertas épocas del año. Por ejemplo en Costa Rica, específicamente Tamarindo (10kms, media maratón, 30kms y maratón) y

Quepos (media maratón, 30kms y maratón) donde se realizan competencias de larga distancia, se alcanzan temperaturas medias diarias de 30°C y 29°C (Tamarindo, 21 setiembre del 2013 y Quepos 20 abril 2013, respectivamente), la temperatura media de la estación Pinilla del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2015, reporta que en la última década la temperatura promedio del mes de setiembre (maratón Tamarindo) es de 26.9°C, una humedad relativa de 86.8%, radiación de 16.3 MJ/m<sup>2</sup> y 287.1 mm/m<sup>2</sup> (IMN, 2015).

Por su parte, Mohammed y Thomson (2012), mencionan que un incremento en la humedad ambiental (70% humedad relativa) a una intensidad de 70% del VO<sub>2</sub> máx, mantenido por una hora y a 30°C, aumenta el estrés cardiovascular, por encima de los niveles normales del ejercicio a estas intensidades en otras condiciones ambientales (42% y 24% humedad relativa).

El American College of Sport Medicine (ACSM) (2007), aporta que la posibilidad de sufrir un “golpe por calor” suele ocurrir cuando el índice de estrés termal exceda los 28°C, durante un ejercicio de alta intensidad (>75% VO<sub>2</sub> máx), y que sobrepase una hora de duración. Es preocupante que muchas de las carreras en Costa Rica se realicen en un ambiente que sobrepasa los índices límites que la ACMS propone.

En los últimos años en Costa Rica se ha registrado un incremento sustancial en la participación en carreras pedestres de 10 kilómetros, media maratón e incluso en maratón. Para el año 2014 se realizaron 165 carreras pedestres avaladas según la Federación Costarricense de Atletismo (FECO A), 24% más que en el año 2013 (127 carreras), convirtiéndose Costa Rica en el último año, en el país latinoamericano con más competencias de esta índole (Rodríguez, 2013). Para el 2015 se realizarían más de 130 carreras avaladas por la FECOA, esta disminución se dio por regulaciones en las leyes de tránsito y políticas públicas, pero se estima que las carreras no avaladas incrementan este número por encima de la cantidad realizada el año 2014 (Mendoza, 2015). A febrero del 2016 se han avalado por parte de la FECOA solamente 58 carreras. Regulaciones como que solamente las competencias organizadas por Asociaciones Deportivas Adscritas a la federación pueden ser avaladas por este ente y por lo tanto con el apoyo de la Dirección General de Tránsito y el Ministerio de Salud (FECO A, 2016),

podrían incrementar las carreras no avaladas y podría aumentar la oferta de carreras de campo traviesa.

Este incremento en la oferta y demanda desmedidas y poco espacio de tiempo entre competencias pedestres, podría provocar que organizadores de carreras populares no garanticen las condiciones adecuadas para la realización de estos eventos en el país, siendo queja constante la falta de asistencia e hidratación, el poco control de tránsito, así como el aumento en los precios de inscripción y de la cantidad de participantes sin inscripción y por lo tanto póliza de seguro de vida o accidente, lo que produce un colapso de los servicios ofrecidos. A lo anterior se le debe sumar que si bien existe un aumento en la cantidad de corredores y de competencias de resistencia también podría existir un aumento en la cantidad de personas que no estarían preparadas para realizarlas.

El desempeño durante un evento de resistencia como la maratón se puede ver comprometido por múltiples factores y pueden aparecer serias consecuencias adversas para la salud durante la carrera o el entrenamiento (Fredericson y Misra, 2007; Hanssen et al., 2011; Kyrolainen et al., 2000; Maughan y Miller, 1983; Neilan et al., 2006; Nieman et al., 2002; Rae et al., 2010; Satterthwaite et al., 1996; Siegel, Silverman, y Lopez, 1980; Van Middelkoop, Kolkman, Van Ochten, Bierma-Zeinstra, y Koes, 2008; Warhol, Siegel, Evans, y Silverman, 1985; Yared y Wood, 2009).

Algunos factores como el calor y la mala hidratación pueden causar problemas de salud y suelen aparecer con relativa alta frecuencia en corredores, dependiendo de las condiciones ambientales y comportamientos riesgosos de los participantes de este tipo de eventos (Howe y Boden, 2007; Roberts, 2000). Otros como lesiones, daño muscular y dolor están muy relacionadas al entrenamiento, investigaciones sugieren que el 50% de los corredores de maratón experimentan alguna lesión relacionada al entrenamiento y/o durante o inmediatamente posterior al evento (Fredericson y Misra, 2007; Maughan y Miller, 1983; Van Middelkoop et al., 2008). El 90% de los corredores experimentan algún problema específico de salud durante la maratón o la semana posterior (Satterthwaite et al., 1999), algunos de estos problemas no son serios, se refieren ampollas, dolor muscular, aumento de tensión muscular, las cuales persisten durante la

semana posterior o incluso más, un pequeño número de corredores (6%) tienen complicaciones requiriendo atención médica inmediata.

Se ha tratado de desestimar el término de lesión en el corredor. Macera et al. (1989) defienden que no se le puede definir lesión a aquellas que no cumplan con las siguientes características: altere el entrenamiento normal, requiera medicación o atención médica. Con base en lo anterior define la lesión en el corredor como una condición o lesión muscular, articular u ósea de las extremidades inferiores que se le atribuya a la participación de eventos o entrenamiento. La incidencia de lesión en los corredores en un periodo de un año es de 54.8% en corredores participantes de la maratón de Rotterdam (Van Middelkoop et al., 2008), 31% en corredores aficionados caracterizados por los autores como no élites (Holmich, Christensen, Darre, Jahnsen, y Hartvig, 1989) y de 58% en corredores aficionados participantes de un maratón (Maughan y Miller, 1983).

Entre las lesiones más comunes de los corredores se encuentran el Síndrome Patelofemoral, Síndrome de Fricción de la Banda Iliotibial, fascitis plantar, lesiones meniscales, síndrome de estrés tibial, tendinitis patelar y tendinitis del Aquileo (Taunton et al., 2002). Así como las articulaciones más afectadas son la rodilla, tobillo y pie en ese orden de frecuencia (Maughan y Miller, 1983; Van Middelkoop et al., 2008). Por otro lado, el riesgo de muerte por causas cardiacas asociada a participar en un maratón según Maron, Poliac y Roberts (1996), es de 1 caso cada 50.000.

La cantidad de eventos y la facilidad de acceso a cada uno de ellos ha provocado que se compita más veces al año y con lapsos cortos de recuperación entre eventos, deja el cuestionamiento de qué tanto tiempo se debe esperar entre eventos para no afectar la salud. Autores como Pfitzinger y Douglas (2012) mencionan que una recuperación general posterior a un maratón se podría dar aproximadamente 7 semanas después del evento, este lapso es considerado como adecuado para iniciar un nuevo entrenamiento para el próximo evento y este no debe ser de menos de 10 semanas. Si bien existen estudios que reportan ciertos lapsos adecuados para el reinicio del entrenamiento no se puede con certeza, ya que cada persona tiene características físicas y mentales propias y requerimientos específicos para reiniciar la preparación para otro evento de este tipo.

A toda la evidencia presentada anteriormente se le debe agregar una posible tendencia de las personas participantes de este tipo de eventos a no prepararse de una manera óptima, entiéndase como prepararse, el entrenamiento previo, durante la carrera y recuperación posterior (Yeung, Yeung y Wong, 2001). Posibles condiciones ambientales adversas (ACSM, 2007; ASM, 2001) y otros factores de riesgo como lesiones previas (Maughan y Miller, 1983; Van Middelkoop et al., 2008), hacen de estas competencias, eventos peligrosos y arriesgados.

No existe evidencia clara sobre el efecto neuromuscular que puede causar el competir en eventos de resistencia y la incidencia en la función orgánica que provocaría. Los elementos y factores descritos con anterioridad, justifican la realización de un muestreo de las posibles respuestas neuromusculares que podrían verse alteradas durante una competencia tan exigente como lo es un maratón y que esto pueda traer en decremento la salud del participante, poniendo en riesgo su cuerpo y exponiéndose a condiciones inadecuadas para la realización de ejercicio físico.

No se cuenta con el conocimiento de cómo los cambios neuromusculares posteriores a un maratón en condiciones extremas de calor y humedad pueden influenciar en la recuperación del atleta y por lo tanto en la salud del mismo.

Añadido a ello, se enriquecerá el conocimiento científico en nuestro país alrededor de los efectos fisiológicos y bioquímicos que los eventos de resistencia pueden llegar a tener bajo las condiciones específicas de esta región. Esto brindaría herramientas para mejorar la planificación y organización de eventos pedestres, así como de otros deportes, aunado a una mejora en la calidad y seguimiento del proceso preparatorio de los participantes. El objetivo del presente estudio fue describir los efectos neuromusculares que conlleva la participación de corredores aficionados en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico y cinemático.

### **1.3 Objetivo General**

- Describir los efectos neuromusculares que conlleva la participación de corredores aficionados en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico y cinemático.

### **1.4 Objetivos Específicos:**

- Describir el comportamiento neuromuscular del recto femoral y el vasto medial en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico.
- Describir el comportamiento neuromuscular del recto femoral y el vasto medial en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje cinemático.
- Describir el comportamiento de la rigidez muscular y del tiempo de contracción en las diferentes sesiones de medición del recto femoral en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico.
- Describir el comportamiento de la rigidez muscular y del tiempo de contracción en las diferentes sesiones de medición del vasto medial en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico.
- Analizar si existen diferencias entre hombres y mujeres posteriores a la participación en eventos de resistencia como el maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico.
- Describir los grados de simetría y diferencias tensiomiográficas entre miembros inferiores en los diferentes momentos de medición en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad desde un abordaje tensiomiográfico.
- Correlacionar valores descriptivos de los participantes con valores tensiomiográficos y cinemáticos en un maratón en condiciones extremas de calor y humedad.

## **Capítulo II**

### **MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1 Antecedentes Maratón:**

Los humanos han recorrido distancias más largas que un maratón, esto sucedía en los pueblos nómadas y cazadores, uno de los recursos más importantes del ser humano era su resistencia, en la caza el ser humano acechaba a su presa hasta que la misma agotada cediera (Jones, 2003).

Existen evidencias históricas de que la forma de desplazarse corriendo o marchando se utilizaba como forma de entrenamiento militar, por ejemplo Jones (2003), relata cómo el rey Taharka de Egipto realizaba carreras para mantener a su ejército a la altura mediante distancias como 100 kilómetros, una de las distancias populares hoy en día conocidas como ultra maratón. Este mismo autor rescata que durante el siglo XIX, los mejores corredores en la sociedad civil y en la milicia eran mensajeros, incluso más eficientes que los caballos.

El maratón es un evento de ruta de la disciplina del atletismo que consta de recorrer una distancia oficial de 42.195 metros o 26.2 millas (De Biasse, 2015; IAAF, 2014). El evento fue realizado en conmemoración a la leyenda del guerrero o heraldo griego Pheidippides (530 a.c-490 a.c.), mensajero durante la Batalla de Maratón. La leyenda relata que el guerrero mencionado fue enviado desde la ciudad de Maratón hasta Atenas para anunciar que los persas liderados por el general Datis habían sido derrotados. Estos hechos sucedieron entre agosto y setiembre del año 490 a.c. (Lucas, 1976; Sears, 2008). Se relata dentro de la historia que el guerrero corrió todo el trayecto de 40 kilómetros sin parar y desfallecido a su llegada a la ciudad de Atenas dijo en griego *‘νενικήκαμεν’*, que significa ‘ganamos’, previo a morir (Muller, 2012). Lucian de Samasota en el segundo siglo a.c., menciona la historia pero con el nombre de Pheidippides, a quién anteriormente se le había denominado Thersipus de Erchhius o Eucles por Heraclides Ponticus (AIMS, 2012; Jones, 2003; Lucas, 1976).

Existen varias versiones de esta historia, por ejemplo 50 años después del acontecimiento, Herodotus escribió que Pheidippides había sido enviado de Atenas a Esparta para solicitar ayuda, quien regresó con una respuesta de ‘no’, para los griegos,

esta historia se conmemora hoy con una carrera de 240 kilómetros, calculada en un día y medio (Muller, 2012), quién Jones (2003), considera una historia más probable.

El maratón fue considerado dentro de los primeros juegos olímpicos (JJOO) modernos en 1896, finalizando en el Estadiu Penethennikon. Fue considerado para su incorporación a JJOO por el Barón Pierre de Coubertin motivado por la inclusión de la historia de Pheidippides en un poema de Robert Browning. Fue una modificación al programa de los JJOO sustancial ya que la distancia más larga hasta el momento en los JJOO era de menos de 5000 mts (AIMS, 2012; Jones, 2003).

En 1894 Pierre de Coubertin fundó el Comité Olímpico Internacional (COI). Durante el congreso del COI realizado en París el 23 de junio de 1894, Michel Breal (1832-1915) se sentó a la derecha del señor Coubertin, y luego de una charla termina con la frase 'citius, altius, fortius' autoría del padre Didon, sacerdote dominico conocido por toda Francia. Esta frase de Didon es utilizada desde ese momento por el COI como su lema (Muller, 2012).

Los JJOO de 1896 fueron en Atenas y uno de los coordinadores de las carreras de larga distancia fue Michel Breal, quien convenció al gobierno griego de incluir este evento basado en tan maravillosa historia, por este gesto Breal es considerado por AIMS (2012b) como el fundador de la maratón.

El primer maratón olímpico se llevó a cabo con once corredores el 10 de abril de 1896, el ganador fue Spiridon Louis un recolector de agua con un tiempo de 2:58:50. Las reglas de esta maratón fueron: salida a la una de la tarde, cada corredor es supervisado por un juez, el ganador es el primer corredor que llegue al estadio Penethenikon, aquél que tome transporte o acorte camino será descalificado (Muller, 2012).

Un mes antes del evento olímpico se llevó a cabo el Campeonato Griego con 11 competidores corriendo desde Maratón hasta Atenas, esta fue el primer maratón realizado, dos semanas después se realiza otra con 38 corredores y el ganador tuvo una marca de 3:11:27, Spiridon Louis llega de quinto con una marca de 3:18:27. (AIMS, 2012).

Se realizaron muchas carreras de 40 kms con el fin de romper el récord de Louis. En Estados Unidos el New York Athletic Club organizó un maratón de 25 millas o 40.23

kilómetros, el primero fue 30 minutos más lento que Louis. Uno de los corredores retirados en Atenas a los 23 kilómetros era Arthur Blake, miembro de Boston Athletic Association, en 1987 la primer BAA Boston Marathon fue realizada. La maratón fue ganada por John McDermott con 2:55:10 en 39 kilómetros (AIMS, 2012).

La distancia actual de maratón se estableció en los JJOO de Londres en 1908, iniciando en el Castillo Windsor y terminando al frente del Royal Box, dónde la Reina Alexandra pudiera ver el final, con una distancia de 26 millas o 41842 metros. Una posterior petición de la reina de trasladar la salida desde el ala este del Castillo de Windsor para que pudiera ser visto por los hijos reales añadió los restantes 352 metros o 385 yardas (AIMS, 2012).

El primer acontecimiento registrado como adverso al correr un maratón fue la caída por agotamiento cuatro veces en los últimos 500 metros del ganador de la maratón olímpica de Londres 1908 el italiano Dorando Pietri, quién se recuperó bastante rápido, menos fortuna tuvo el portugués Francisco Lázaro quién a los 30 kilómetros de una acalorada maratón durante las olimpiadas de Stockholm, cae con agotamiento por calor y murió al día siguiente, siendo la única muerte debido a un maratón olímpico (AIMS, 2012).

El maratón desde entonces empezó a tener popularidad, los corredores élite bajaban de 5 minutos por milla en el ritmo de carrera el evento se hacía más popular, en 1972 Frank Shorter gana la maratón olímpica y aumenta el perfil de los corredores de maratón en los Estados Unidos de América. En 1975 la maratón de Boston por ejemplo tuvo un registro de 1800 corredores. En 1976 se fundó la maratón de New York, en 1980 Berlín y en 1981 Londres. De repente según AIMS (2012), ninguna gran ciudad escaseaba de maratón.

El primer evento de resistencia pedestre documentada en Costa Rica fueron los 100 kilómetros por la línea del tren desde la ciudad de San José hasta Puntarenas. Esta carrera fue realizada desde 1914 hasta 1938. El primer ganador de la competencia fue Octavio Rojas con un tiempo de 19:20:00 en una distancia de 125 kilómetros, hasta el último ganador de este evento Alfredo Pineda con 4 horas menos que en la primera edición en una distancia de 116 kilómetros. En este evento sobresalió Antonio

‘sanjuaneño’ Rodríguez, quién es categorizado como el máximo exponente del atletismo de fondo de este país en las primeras décadas del siglo XX (Lobo-Di Palma, 2010).

En Costa Rica el primer fondista surgió en los años 60, Rafael Ángel Pérez, quién tiene entre sus logros la participación en los JJOO de Munich 1972, el triunfo en 1974 en la carrera San Silvestre en Brasil y en 1976 ganador de la media maratón de San Blas de Illescas en Puerto Rico. En los años 80, Francisco Zúñiga ganó el oro en el Mundial Máster de Maratón en 1983. Otra figura importante fue Ronald Lanzoni ganador de la medalla de plata en los Juegos Panamericanos de Indianápolis, Estados Unidos y participante de los JJOO de Seúl 1988. Más recientemente, José Luis Molina se corona como primer lugar de la maratón de Los Ángeles y participante de los JJOO de Atlanta 1996. En Beijing 2008 se obtiene la participación de Gabriela Traña la primera mujer costarricense en participar en los JJOO en el evento de maratón. Más tarde en Londres 2012 Gabriela Traña y César Lizano participan en los JJOO (Calvo, 2015).

En los últimos años 20 años a nivel mundial, las participación en carreras de maratón se ha convertido como lo describen Billat, Mille-Hamard, Meyer y Wesfreid (2009), un fenómeno social, la participación en eventos como la maratón de Londres, Paris, Berlín o New York, sobrepasa los 35.000 participantes, sin tomar en cuenta el total de corredores que aplican para la inscripción en la misma.

De BIASSE (2015), indica que en 41 años la cantidad de participantes de la maratón de New York ha aumentado de 170 a 39.000 corredores. Lundstrom (2015), este autor menciona que en los Estados Unidos ha incrementado la popularidad de carreras de calle, incluyendo la maratón, estimando más de 500.000 finalistas por año, comparado con 25.000 en 1976. Este aumento en la cantidad de eventos podría provocar que los corredores se podrían estar aventurando a participar sin un adecuado entrenamiento o con poco tiempo de recuperación entre un evento y otro, pero que indican que una de las razones de su participación es los beneficios en su salud.

Entrenar y competir para realizar un maratón representa una serie de retos y muchas variables involucradas que pueden de una u otra manera predecir el desempeño deportivo de una persona (Lundstrom, 2015), a continuación se analizarán estos factores.

## 2.2 Condiciones fisiológicas del corredor de maratón

Para la consecución de un buen desempeño en un maratón, se deben tomar en cuenta muchos factores como se ha señalado anteriormente, básicamente se puede referir a dos generales, el entrenamiento y la genética, dejando los factores ambientales como circunstancias externas.

Según Pfitzinger y Douglas (2012), rescatan ciertas características que un corredor de maratón debe poseer desde un punto de vista fisiológico, son las siguientes: elevada proporción de fibras musculares de contracción lenta, umbral de lactato elevado para poder producir un energía a un ritmo aeróbicamente más alto sin fatiga, altos depósitos de glucógeno y buen desarrollo de la utilización lipídica, almacenando suficiente glucógeno en los músculos y el hígado pero permitiendo a los músculos depender de los lípidos como combustible, una excelente economía de carrera, elevado consumo de oxígeno transportando así cantidades de oxígeno a los músculos y de estos para utilizarlo de manera eficiente y por último una rápida recuperación, reponiéndose de la manera más adecuada del estrés del entrenamiento.

### 2.2.1 Consumo de Oxígeno Máximo ( $VO_{2m\acute{a}x}$ )

El  $VO_{2m\acute{a}x}$  es la variable predictiva del rendimiento deportivo por excelencia en deportes de resistencia o de larga duración según Lundstrom (2015). Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme (2010), lo señalan como la capacidad máxima de captar oxígeno del ambiente, transportarlo por vía sanguínea y utilizarlo a nivel celular, como medio para producir energía. Por otro lado se ha señalado como la máxima cantidad de oxígeno que se puede consumir durante un trabajo o ejercicio extenuante para la producción aeróbica de Adenosin Trifosfato (Astrand et al., 2010).

Es por lo anterior que es común encontrar en deportistas de alto nivel en deportes como esquí, campo traviesa, maratón o ciclismo los mayores valores de  $VO_{2m\acute{a}x}$  a nivel mundial, por lo que existe según Costill, Thomason y Roberts (1973), correlación muy alta ( $r=-0.91$ ) entre los valores altos de  $VO_{2m\acute{a}x}$  y menores tiempos en competencias de 10 millas. También representa un factor protector contra enfermedades cardiovasculares.

Una persona masculina sedentaria de 35 años tiene un  $VO_{2m\acute{a}x}$  de 45 ml/kg/min, un corredor masculino de 35 años, considerado de ritmo medio de maratón tiene 55

ml/kg/min, un avanzado 60-65 ml/kg/min y un profesional 70-75ml/kg/min (Pfitzinger y Douglas, 2012). Por otro lado Martin y Coe (2007) indica que una persona no atleta en esfuerzo máximo puede alcanzar 45 ml/kg/min y un atleta 75 ml/kg/min, a pesar de que ambos tienen 3.5 ml/kg/min en estados de reposo.

Radio de Intercambio Respiratorio (RIR) se define como un indicador del radio de utilización de lípidos y carbohidratos como fuente energética durante un ejercicio físico (Coyle, 1995; Hawley y Spargo, 2007; Jeukendrup y Wallis, 2005; Ortega y Velasco, 2009). Este parámetro es de suma importancia para el entrenamiento de maratón ya que indica el punto en el cuál se encuentra el umbral anaeróbico, factor determinante para controlar el ritmo de carrera.

### *2.2.2 Umbral anaeróbico*

Una de las condiciones más importantes según Pfitzinger y Douglas (2012) para tener un buen desempeño en maratón es mantener umbrales anaeróbicos (UA), también conocido como umbrales de lactato (UL), elevados. Este factor es un determinante directo del posible límite de rendimiento de una persona que realiza una actividad de duración mayor a los 30 minutos.

Según McArdle, Katch y Katch (2015), describen este punto como promotor de la depleción del glucógeno, ya que la intensidad si se sobrepasa el UA es lo suficientemente alta como para utilizar glucógeno en un alto porcentaje. El ejercicio durante tiempos prolongados como es el caso del maratón, provocaría un gasto de las reservas, provocando esta condición, que conlleva a un agotamiento del glucógeno muscular. Este evento sucede alrededor de los 180 min de actividad.

El ritmo de carrera se ve limitado por la acumulación de lactato (el mismo es un subproducto del proceso de consecución de energía conocido como metabolismo de los hidratos de carbono) y los iones de hidrógeno contenidos en los músculos y la sangre. Los niveles de lactato determinan el ritmo al que los músculos pueden mantener la producción de energía aeróbica, los corredores profesionales, tienen un ritmo muy cercano al UA (Pfitzinger y Douglas, 2012).

El UA de los corredores promedio o aficionados sucede aproximadamente a los 75-80% del  $VO_{2máx}$ , los corredores profesionales lo alcanzan a los 88-90% de su capacidad

aeróbica máxima. Lo que significa que los corredores profesionales pueden tener ritmos de carrera más elevados sin que el lactato se acumule en sus músculos (Pfitzinger y Douglas, 2012).

La acumulación de lactato produce una liberación de iones de hidrógeno que desactivan a su vez las enzimas que intervienen en la producción de energía e intervienen en la captación de calcio reduciendo la capacidad de contracción de los músculos, por lo que el corredor se ve forzado a disminuir el ritmo de carrera, lo que explica por qué se debe correr por debajo del UL durante una maratón. La adaptación muscular por medio del aumento del tamaño y número de mitocondrias permiten a un corredor producir más energía produciendo oxígeno (Pfitzinger y Douglas, 2012).

El UA normalmente coincide con niveles de lactato en sangre menores a 4.0 mmol/L, se define con frecuencia el UA como un estado entre 2.0-4.0 mmol/L (Noakes, 2003).

### *2.2.3 Vías de adaptación fisiológica para mejor desempeño*

La mitocondria es la única parte de la fibra muscular capaz de producir energía de forma aeróbica, a mayor proporción de mitocondrias más energía aeróbica se podrá producir y así mantener ritmo más elevados de carrera se podrán mantener, más del 99% de la energía producida durante un maratón es de naturaleza aeróbica según Pfitzinger y Douglas (2012). Esto es respaldado por Kraemer, Fleck y Deschenes (2012) quienes indican que ejercicios de 120 minutos o más de duración son caracterizados por ser 100% aeróbicos.

Las enzimas mitocondriales por otro lado aceleran la producción de energía aeróbica, la elevación del UA como respuesta a correr cercano al UA, permite incrementar la actividad enzimática aeróbica, mejorando la eficiencia mitocondrial. A lo anterior se le debe agregar el aumento de la capilarización de las fibras musculares como una vía de mejora, ya que con el aumento en la cantidad de los capilares, se mejora la eficiencia en el transporte de la sangre y por lo tanto de oxígeno disponible a nivel celular para ser aprovechado por las mitocondrias, y disminuye la acumulación de sustancias de desecho dentro de la fibra como dióxido de carbono (Pfitzinger y Douglas, 2012).

Otra forma efectiva es el almacenamiento óptimo de glucógeno y su buena utilización ya que es el principal combustible empleado en la maratón. Las dos maneras de asegurar que los depósitos no se agoten es entrenar el sistema para almacenar gran cantidad de glucógeno y conservarlo a ritmo de maratón. Durante la maratón se emplea una combinación entre glucógeno y grasas, cuando existe déficit de glucosa se recurre a la grasa, lo que fuerza a disminuir el ritmo de carrera (Pfitzinger y Douglas, 2012).

### **2.3 Fatiga en maratón:**

Coyle (2007), indica que la clave para el éxito de corredor un maratón es realizar un desempeño a la máxima velocidad y un consumo de oxígeno que los músculos involucrados en el ejercicio puedan tolerar sin experimentar fatiga, sin olvidar que esta va a progresar posterior a los 20 kilómetros. El  $VO_{2\text{máx}}$  durante la competencia se puede mantener estable mediante un adecuado ritmo de carrera y puede por medio la resíntesis de ATP prolongarse el ritmo durante la totalidad de los 42 kilómetros. Existen claro diferencias en hombres y mujeres quienes tienen diversos comportamientos en la regulación hormonal, capacidad aeróbica y depósitos de tejido graso (Deaner, 2006; Deaner et al. 2011), estas diferencias son de un 10-12% (Noakes, 2001).

Una de las causas de la fatiga durante un maratón es la acidosis progresiva, lo prolongado de la actividad llega a puntos en los cuales el lactato se acumula en sangre así como en las fibras musculares, ocasionando una alteración en la homeostasis celular (Coyle, 2007).

#### *2.3.1 Marcadores sanguíneos (Creatin Fosfoquinasa [CPK])*

Brancaccio, Maffulli y Limongelli (2007), indican que los niveles séricos de CPK aumentan a un nivel máximo a las 24 horas posteriores a la actividad, para luego descender paulatinamente con el descanso y la recuperación.

Los valores normales en corredores de maratón de CPK son de 160 U/l y 161 U/l según Siegel et al. (1980), y 123U/l según Clemente (2011). Clemente (2011), indica que posterior a un maratón de montaña (2147 m de desnivel) se dan cambios significativos en los datos de CPK ( $123\pm 24.7$  U/l a  $408.3\pm 307.3$ ) y lactato sanguíneo ( $2.0\pm 0.9$  mmol/l a  $3.7\pm 1.1$  mmol/l), lo que muestra que posterior a un maratón se

incrementan los marcadores sanguíneos responsables del daño muscular en 8 sujetos de 33.5 años quienes duraron 222.9 minutos como promedio en la prueba. Las muestras fueron tomadas 2 horas antes de la prueba e inmediatamente posterior a la misma. Aunque las condiciones físicas y técnicas que se ponen a prueba durante un maratón de montaña son más exigentes el comportamiento de los marcadores bioquímicos son muy similares a los encontrados en otros estudios.

En estudios anteriores se reportan cambios relativamente bajos para eventos de resistencia en los valores de CPK como lo reportan Sánchez-González et al (2003) ( $465 \pm 254.14$  U/l) inmediatamente posterior a realizar un maratón, así como modificaciones más elevadas como lo señalado en Kratz et al (2002), Smith et al (2004) y Siegel et al (1980, 2007) ( $843.8 \pm 782.3$ ,  $707.8 \pm 376.7$ , 3424 y  $745 \pm 97$  U/l respectivamente). Siegel et al. (1980), reporta cambios de 160-1500 U/l y niveles en corredores competitivos (tiempos inferiores las 3 horas 30 minutos) por encima de 4500 U/l, 24 horas posterior a la actividad, lo anterior hace suponer la inminente rotura celular debido al trabajo muscular intenso y pequeñas microlesiones que conlleva la exposición del cuerpo humano a este tipo de eventos.

Clemente (2011), explica los menores valores de CPK en los individuos de la maratón de montaña comparado a las de ruta, debido a que comúnmente los eventos de maratón se corren por asfalto, un terreno más duro y compacto con lo cual los repetidos impactos al realizar las zancadas podrían desencadenar una mayor rotura de fibras que al correr por tierra en una maratón de montaña, al ser esta superficie menos dura y con mayor tendencia a absorber el impacto.

#### **2.4 Entrenamiento y Economía de Carrera:**

La economía de carrera (EC), es conocida como el nivel de oxígeno requerido para realizar un trabajo submáximo y mantener ese ritmo por un tiempo prolongado (Saunders, Pyne, Telford, y Hawley, 2004).

La EC es un aspecto primordial en corredores de larga distancia ya que a mayor EC se puede realizar el mismo trabajo con menor utilización energética (Saunders et al., 2004). También colabora a que el corredor pueda ser capaz de cubrir largas distancias sin experimentar fatiga considerable (Joyner y Coyle, 2008).

La EC puede ser influenciado por diferentes aspectos según Saunders et al. (2004), entre ellos están el entrenamiento, el entorno, funcionamiento fisiológico del corredor, biomecánica de carrera y aspectos antropométricos. Aspectos biomecánicos como amplitud de la zancada, baja oscilación vertical, menor ángulo en la rodilla durante la fase de vuelo de la pierna suspendida, disminución en el movimiento de brazos, son parte elemental para mantener una adecuada EC (Anderson, 1996). Existe según Bonacci, Chapman, Blanch y Vicenzino (2009) un factor de adaptación neuromuscular al entrenamiento primordial en la EC.

Desde un punto de vista biomecánico, las mejoras en la técnica que influyen en la EC, son: zancadas más largas, la fase de desaceleración se acerca más al punto por debajo del centro de gravedad, periodo más largo de vuelo, reducción de oscilación vertical y un aumento de la flexión de rodilla la finalizar el impulso hacia el frente según Martin y Coe (2007).

Noakes (2001), menciona los aspectos ambientales que influyen en la EC, entre ellos menciona la superficie, viento, altitud y cambios en la elevación. Saunders et al. (2004), rescata factores fisiológicos que influyen en la EC como frecuencia cardiaca, temperatura del cuerpo, ventilación y niveles de productos metabólicos como lactato. Brooks et al. (2005), indican que un aumento ligero de la temperatura corporal mejora el rendimiento, pero si la temperatura aumenta por encima de los valores normales sucede lo inverso por lo que las funciones metabólicas se tornan poco económicas, lo anterior debido a las respuestas normales del ejercicio en alta temperatura como aumento de frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria y niveles de lactato en sangre, lo que significa un aumento en el gasto energético.

Se ha demostrado que existe una relación entre la EC y la tensión músculo tendinosa, esto se demuestra en el estudio de Fletcher, Esau y MacIntosh (2010), quienes demostraron una correlación entre los cambios en la EC y el aumento de tensión del tendón del tríceps sural.

Desde de un punto de vista antropométrico se ha demostrado que el peso corporal tiene una relación inversa con el consumo de oxígeno en carrera (Pate, Macera, Bailey, Bartoli, y Powell, 1992; Saunders et al., 2004; Williams y Cavanagh, 1987).

## 2.5 Variación del ritmo de carrera durante un maratón:

El maratón normalmente se corre en porcentajes de frecuencia cardiaca descrito por los autores como ‘altos’ (80-100%) de la frecuencia cardiaca máxima y del consumo máximo de oxígeno, con un promedio de duración de tres horas cincuenta minutos (3hrs 50min), en eventos como Paris, New York, Boston y Londres (Basseville y Nikiforov, 1993; Maron, Horvath, Wilkerson y Gilner, 1976).

Douglas, O’Toole, Hiller, Hackery y Reichek (1987) y Neilan et al. (2006), mencionan que la incidencia de muerte súbita en maratonistas ha aumentado, así como lesiones al miocardio y disfunción ventricular asociadas a los altos niveles de entrenamiento de participantes no profesionales posterior a eventos como maratón, campo traviesa, esquí y triatlón.

Calbet (2006) indica que en corredores aficionados de maratón la velocidad de carrera decrece a medida que progresa la curva de depleción del glucógeno y aumentan los desórdenes neuromusculares. Billat et al. (2009), menciona que la fatiga disminuye exponencialmente el ritmo de carrera y afecta el proceso de regulación corporal.

Una de las consecuencias de la participación en eventos y entrenamientos poco personalizados de resistencia según Burt, Lamb, Nicholas y Twist (2012), es la aparición de síntomas asociados al daño muscular inducido por el ejercicio (DMIE) en los días posteriores. Estos síntomas incluyen dolor, elevación de proteínas sanguíneas, disminución en la capacidad funcional del músculo, reducido control neuromuscular.

Durante eventos de resistencia existen muchos factores que pueden influenciar el ritmo de carrera de un corredor, por ejemplo, cambios en el terreno, elevación, ambiente, temperatura o fatiga. El entrenamiento de maratón utiliza como estrategia el mantenimiento de un ritmo constante o variable dependiendo de las condiciones de carrera (Haney, 2010). El fenómeno que cambia súbitamente el ritmo de carrera es conocido como el ‘choque con el muro’ o en inglés ‘*hitting the wall*’, es reconocido por Coyle (2007) como una consecuencia de la depleción de glucógeno o hipoglicemia, esto disminuye la capacidad del cuerpo a mantener la intensidad necesaria.

Haney (2010), señala que la forma más común de reportar la variabilidad del ritmo de carrera es mediante el cálculo del coeficiente de variación de la velocidad ( $CoV_{vel}$ ), representa el radio de la desviación estándar (DS) y la media (M):  $CoV_{vel} = DS/M * 100$ ,

en esta fórmula se utilizan los valores registrados por un solo sujeto durante el maratón. El mismo autor menciona que el  $CoV_{vel}$  medido con dispositivos GPS (1-5Hz) durante dos maratones de San Diego fueron de  $16.6 \pm 6.3\%$  y  $16.7 \pm 6.5\%$  respectivamente y las variaciones más frecuentes fueron de entre 12-15%. Los corredores que finalizaron primero tienen baja variabilidad en el ritmo de carrera (aproximadamente 20s de diferencia en lapsos de 5kms), comparado con corredores promedio que tienen (3 minutos de diferencia entre los 5 km más veloces y los más lentos). Billat, Slawinski, Danel y Koralstztein (2001), reporta en corredores profesionales de media distancia (3000-10000 m), un  $CoV_{vel}$  de la velocidad de 1-5%.

Del Coso et al. (2013), en un estudio previo determina un punto de corte para la separación de la muestra en dos grupos en el cual toma una variación del ritmo de carrera de -15% (porcentaje de cambio) como punto de separación de ambos grupos (-15% o menos grupo de variación de ritmo y a -15% o más grupo de ritmo estable). El porcentaje de cambio se obtuvo de la siguiente manera:

$$((m/s \text{ primero } 5kms - m/s \text{ últimos } 5kms) / m/s \text{ últimos } 5kms) * 100 = \% \text{ cambio}$$

Ely et al., (2008), mencionan en un estudio dónde relacionaba la temperatura ambiental con la disminución del ritmo de carrera, concluyendo que los primeros 5kms fueron los más veloces, posteriormente se disminuye el ritmo de carrera manteniéndolo de los 10- 25kms, a partir de este punto se presenta una desaceleración hasta los 40kms, en los últimos 2195 metros se presenta una aceleración normal en todas las carreras. Lo contrario sucede en los corredores profesionales quienes presentan velocidades mayores entre los kilómetros 35- 40 comparado con los últimos 2.195 metros.

## **2.6 Ejercicio en condiciones extremas de calor y humedad**

Existen muchos elementos a considerar cuando se desea determinar el riesgo que representa el ambiente, por lo que la aclimatación es de suma importancia. Las personas que suelen participar en eventos extenuantes suelen tener menor riesgo pero siguen experimentando el impacto de la aclimatación a situaciones de climas extremos (De Biasse, 2011).

La combustión de las sustancias base de donde se toma la energía para realizar trabajos como la carrera produce tanto adenosin trifosfato como calor, en un inicio tiene

la función de aumentar la temperatura corporal para facilitar los procesos metabólicos mediado por la distribución de este calor por todo el organismo, esto se presenta hasta los 40 grados. Si esta producción de calor aumenta a medida que pasa el tiempo y se le suma el calor del ambiente y la incapacidad que la humedad elevada brinda al cuerpo de poder disipar el calor de manera adecuada por medio de la sudoración, pueden sobrepasarse los límites de funcionamiento óptimo, condiciones que si sobrepasan los 42 grados centígrados de temperatura interna del cuerpo, el sistema podría colapsar y provocar la muerte (Ortega y Velasco, 2009; Wilmore y Costill, 2005).

Existen cuatro formas de pérdida de calor del organismo que permiten no llegar a este límite, la conducción, la radiación, convección y la evaporación del sudor. La mayor parte del calor producto de la actividad física se libera por este último medio. Habría que perder más de seis litros de sudor para perder las sales minerales esenciales para la función muscular pero con una pérdida de más de un litro ya es una cantidad significativa para que ocurra una disminución en esta función orgánica (Ortega y Velasco, 2009).

Cuando la humedad ambiental es alta, el cuerpo pierde la capacidad de disipar calor por medio de la evaporación del sudor lo que provoca una condición de hipohidratación, en condiciones en las cuales no exista un consumo de líquidos adecuados durante la actividad, lo que podría conllevar posteriormente a una disminución del ritmo de carrera o una condición o situación riesgosa para la salud como lo es un síncope, golpe por calor o incluso hasta la muerte (Ortega y Velasco, 2009).

La temperatura ambiental ideal para realizar ejercicio físico según Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme (2010), debe ser menor a los 20°C, cuando el ejercicio es intenso es preferible 15°C o menos. Kenefick (2009), reporta un descenso de un 17% en el desempeño de carrera cuando se compara una actividad a 40°C con una a 22°C.

Por su parte, Mohammed y Thomson (2012), mencionan que un incremento en la humedad ambiental (70% humedad relativa) a una intensidad de 70% del VO<sub>2</sub> máx, mantenido por una hora y a 30°C, aumenta el estrés cardiovascular, por encima de los niveles normales del ejercicio a estas intensidades en otras condiciones ambientales (42% y 24% humedad relativa).

Hue et al. (2004), determinaron que existe un aumento de la frecuencia cardiaca y tasas de deshidratación en dos condiciones diferentes, en 33.4°C y un 75.5% de humedad relativa comparado con 14°C y 45% de humedad relativa de otro evento de triatlón. Coyle (2007), menciona que en un ambiente húmedo y caliente se da una pérdida del peso de un 2% o más lo que lleva a un aumento en el riesgo de sufrir disminuciones en el desempeño, hipertermia o golpe por calor.

La Sports Medicine Australia (2008), señala que temperaturas de 26-30 °C sumados a una humedad relativa de 60% o más, son calificadas como condiciones de riesgo moderado-alto. Desde ese punto de vista Armstrong y Hubbard (1985), mencionan que una combinación de la humedad 60% y temperaturas de 26.5°C o 40% y 30°C, se considera como de alto riesgo.

Durante ejercicios que expongan al cuerpo a prolongados lapsos de tiempo, se reduce gradualmente el índice de sudoración, incluso si el agua perdida se reemplaza al mismo ritmo y este proceso se reduce más si existe una humedad elevada. Lo anterior causa un aumento de la frecuencia cardiaca, gasto cardiaco aumentado 50-75%, disminuye la resistencia periférica total (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010).

## **2.6 Medición de condiciones ambientales:**

La forma más adecuada de medir el efecto de las condiciones ambientales en eventos de carrera es el Índice de Estrés Termal (TGBH) (Ely et al., 2008) y para medir los límites ambientales en climas calientes para la realización de entrenamiento militar (Moran 2001; Wallace 2005; Budd 2008; Radakovic et al. 2007), por medio de la Temperatura de Globo y Bulbo Húmedo. De Biasse (2015), menciona que es la integración de la temperatura ambiental ( $T_a$ ), temperatura del bulbo húmedo (humedad) ( $T_b$ ) y de la temperatura del globo (radiación) ( $T_g$ ), ello se calcula basado en la siguiente fórmula:

$$TGBH = 0.7T_b + 0.2T_g + 0.1T_a$$

El American College of Sport Medicine (2007), aporta que la posibilidad de sufrimiento de golpe por calor suele ocurrir cuando el índice de estrés termal exceda los 28°C, durante un ejercicio de alta intensidad ( $>75\% \text{VO}_2 \text{ máx}$ ) y que sobrepase una hora de duración.

## **2.7 Anatomía/fisiología neuromuscular:**

Un músculo es un conjunto de células musculares o fibras musculares que tienen la misma longitud al músculo del que forman parte con un grosor menor al de un cabello. Estas fibras se agrupan formando fascículos y estos se agrupan y forman el músculo, este último unido a dos o más huesos por medio de tendones (Ortega y Velasco, 2009).

La contracción es la función principal del músculo, la misma consiste en el acortamiento de su longitud, aproximando su origen y sus inserción, la carrera se produce por las contracciones constantes de los diferentes grupos musculares que permiten el avance del organismo (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Ortega y Velasco, 2009).

### *2.7.1 Función neuromuscular*

Cuando se refiere al complejo neuromuscular, es imperativo entender que tiene dos componentes cada uno con sus características y procesos, la función neural y la función muscular, con estructuras diferentes y bases fisiológicas distintas y que en su conjunto son capaces de realizar un movimiento. A continuación se presentan ambos procesos.

El sistema nervioso se puede dividir en sistema nervioso central (SNC) y periférico (SNP), el primero consiste en cerebro y médula espinal, el segundo de todo el tejido nervioso fuera del sistema nervioso central. El SNP contiene las neuronas aferentes y eferentes, encargadas de enviar y recibir estímulos (respectivamente), por lo que el recorrido de todo estímulo externo o interno del cuerpo que requiere un movimiento recorre un camino cuerpo-cerebro-cuerpo, a excepción de los reflejos osteo-tendinosos, movimientos automáticos y sistema nervioso autónomo (control involuntario de órganos internos) (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Los estímulos se reciben de diferentes formas, por medio de receptores, mecánicos (responde a presión, estiramiento o contracción) y propio receptores (orientación espacial), estos receptores se encuentran en articulaciones, músculos esqueléticos y tendones, su estimulación provoca una respuesta eferente involuntaria o automática

(Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

La neurona es la unidad funcional del SNC y SNP, varía en tamaño y forma dependiendo de su función específica y localización, está compuesta de dos grandes partes, de las dendritas y los axones, las primeras encargadas de la recepción de información, si los estímulos son los suficiente intensos puede estimular el axón, esto a pesar de que su función principal es la de transmitir el impulso a otras células mediante la producción de neurotransmisores y provocación del potencial de acción (PA) (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

La liberación de neurotransmisores como señal química es la responsable de la comunicación entre axones y por lo tanto entre neuronas motoras. Esta comunicación se denomina sinapsis, si la sinapsis se da entre un axón y una estructura muscular se denomina Unión Neuromuscular (UN). Esta carga llamada impulso, transmitida a través de diferentes tejidos es responsable de activar o inhibir actividad fisiológica (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Un impulso con carga eléctrica es conocido como PA, en reposo la neurona se encuentra polarizada a  $-70\text{mV}$ , llamado potencial de reposo (90 veces más iones negativos en el interior que en el exterior de la célula), existe una diferencia de cargas negativas y positivas entre el interior (Potasio,  $\text{K}^+$ ) y el exterior (Sodio,  $\text{Na}^+$  y Cloruro,  $\text{Cl}^-$ ) de la membrana celular respectivamente, a esto se le llama potencial de membrana. La permeabilidad y los gradientes (ambos procesos pasivos, sin gasto energético) provocan salida de iones  $\text{K}^+$  y entrada de  $\text{Na}^+$ , en relación de 2x3, constantemente. Si existe un estímulo eléctrico suficiente para vencer el umbral de membrana ( $-50\text{mV}$ ), la membrana se despolariza hasta aproximadamente  $+30\text{mV}$ , debido a la entrada por gradiente de concentración de 3 iones de  $\text{Na}^+$  a través de un canal abierto  $\text{Na}^+$ , posteriormente vuelve a su estado de reposo ( $-70\text{mV}$ ) a través de una repolarización causada por la entrada de forma pasiva de 2 iones de  $\text{K}^+$  a través de los canales abiertos de  $\text{K}^+$ . El proceso anterior tiene una duración de 1 milisegundo (ms) y es llamado PA

(Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Para volver la célula al estado normal se debe ir en contra del gradiente, por lo que necesita energía, se deben sacar del interior al exterior de la célula, los iones de  $\text{Na}^+$  y del exterior al interior los iones de  $\text{K}^+$  esto se realiza por medio de una proteína llamada Bomba Sodio-Potasio ( $\text{Na}^+\text{K}^+$ ), lo anterior de forma activa, ósea con (gasto de un fosfato del Adenosin Trifosfato (ATP) (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

El PA actúa como un proceso todo o nada, lo que significa que una vez sobrepasado el umbral de membrana, se activa toda la membrana hasta la zona terminal del axón, donde se liberan los neurotransmisores y se produce la sinapsis con otras células.

La UN, por otro lado, tiene características especiales, es la unión entre un axón terminal y una placa motora, cuando un PA alcanza la zona terminal del axón esta se vuelve más permeable al calcio, por lo que permite su entrada, la alta concentración intracelular del calcio hace que las vesículas sinápticas migren a la membrana y liberen por exocitosis el neurotransmisor (acetilcolina, ACo) en la placa motora o sarcolema, lo que provoca cambios en la permeabilidad iónica permitiendo la entrada del  $\text{Na}^+$ , provocando una despolarización del sarcolema, de toda la fibra muscular a través de los túbulos T (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Una vez el PA viaja a través de los túbulos T, se provoca la liberación por parte del retículo sarcoplasmático una cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$ . El  $\text{Ca}^{2+}$ , se une a las moléculas de troponina C (subdivisión de la troponina) ubicada en la tropomiosina de la actina lo que causa un cambio en la configuración de la misma y expone los puntos activos de la actina permitiendo que las cabezas de la miosina se unan a estos puntos y provoquen de esta manera puentes cruzados y por ende la contracción del sarcómero (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

El sarcómero es la unidad funcional del músculo, el músculo se forma de sarcómeros, estos unidos forman miofilamentos, los que en conjunto forman miofibrillas, la mixtura de estas últimas resultan en una fibra muscular, las que componen un fascículo, que en

conglomerado forman un músculo. El sarcómero por su parte está formado por filamentos delgados (actina, troponina y tropomiosina) y gruesos (miosina). Cuando el sarcómero se ve como un conjunto con otros sarcomeros se forman zonas de relación (zona H, banda I, disco Z, banda A y línea M) (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

El sarcómero comprende de banda Z a banda Z, la zona H (*Hellerscheibe*) comprende un área al centro del sarcómero en donde no hay filamentos delgados, la banda I (*isotropic*) es un área en la conexión de sarcomero con sarcomero en la cual no hay presencia de filamentos gruesos, la banda Z (*Zwischenscheibe*) es la estructura que une los filamentos delgados de dos diferentes sarcómeros, la banda A (*anisotropic*) es la zona 'oscura' compuesta por filamentos gruesos y delgados y la zona H, por último la línea M (*Mittelscheibe*), determina el centro del sarcómero (Astrand, Rodahl, Dahl y Stromme, 2010; Martin y Coe, 2007; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

### 2.7.2 Bioenergía en la función neuromuscular

Los músculos requieren de determinado tipo de energía para poder realizar sus funciones, esta energía proviene de la utilización de los hidratos de carbono, grasas y proteínas. Mediante el oxígeno inhalado en cada respiración el músculo produce estas fuentes en energía en forma de ATP (Martin y Coe, 2007) mediante cuatro formas determinadas de combustión, sistema fosfágeno o ATP-CP fosfocreatina (actividades de 10-15 segundos en ausencia de oxígeno), glucólisis anaeróbica (actividades de 1-3 minutos en ausencia de oxígeno), fosforilación oxidativa con hidratos de carbono (3-30 min con presencia de oxígeno) y la fosforilación oxidativa de las grasas (actividades de más de 30 min con presencia de oxígeno). En maratón el sistema fosforilación oxidativa de las grasas aporta de un 45-50%, fosforilación oxidativa de los hidratos de carbono 50% y sistema fosfágeno 5% (Ortega y Velasco, 2009).

### 2.7.3 Fibras musculares de contracción lenta

Las fibras musculares pueden dividirse en dos grandes tipos: contracción lenta (ST), también llamadas rojas o tipo I, las de contracción rápida (FT), llamadas blancas o tipo II (se dividen en tipo IIa y tipo IIb). A mayor porcentaje de fibras de contracción lenta

en los músculos la probabilidad de éxito en deportes de resistencia como el maratón es mayor ya que poseen características naturales que se logran adaptar de buena forma a volúmenes altos de ejercicio, resisten la fatiga de forma apropiada y poseen una capacidad aeróbica alta, una densidad capilar elevada (Martin y Coe, 2007; Ortega y Velasco, 2009; Pfitzinger y Douglas, 2012).

La proporción de fibras ST en el músculo está determinada de forma genética y no cambia con el entrenamiento, aunque las fibras tipo II no pueden convertirse en tipo I con un entrenamiento donde predomine la resistencia, se podrían adaptar adquiriendo características de las fibras ST, especialmente se da esta tendencia en fibras tipo IIa. Lo anterior permite que las fibras de contracción rápida mejoren en su desempeño para producir energía de forma aeróbica (Martin y Coe, 2007; Ortega y Velasco, 2009; Pfitzinger y Douglas, 2012).

Las fibras de contracción rápida alcanzan su punto de máxima contracción de manera más súbita (30ms) y se recuperan más rápido también (70ms), por otro lado las fibras de contracción lenta logran su máxima contracción en 75 ms y se recuperan en 200 ms aproximadamente (Martin y Coe, 2007).

El método para determinar el porcentaje de fibras tipo I o tipo II es mediante una biopsia muscular, de esta forma invasiva se extrae y analiza una pequeña muestra del tejido muscular. Aunque no se pueda realizar mayor intervención al respecto, si se pueden cambiar otras características fisiológicas que ayudan al buen desempeño en maratón (Martin y Coe, 2007; Ortega y Velasco, 2009; Pfitzinger y Douglas, 2012).

Powers y Howley (2012), menciona que corredores de resistencia se componen aproximadamente de un 70-80% fibras de contracción lenta, los deportistas de carrera de velocidad 25-30% y las personas no atletas 47-53%.

Martin y Coe (2007), menciona que la inervación motora forma parte fundamental de la función muscular, un nervio motor se compone de muchas células nerviosas, cada una abarcando varias fibras musculares, el punto motor por otro lado es el lugar de entrada del nervio en el músculo.

Generalmente las neuronas y membranas de las células musculares se encuentran polarizadas eléctricamente, cuando se estimula un nervio motor a un cierto grado

produce una onda de despolarización (potencial de acción), hasta hacer efecto en las uniones neuromusculares (Martin y Coe, 2007; Ortega y Velasco, 2009).

#### *2.7.4 Rigidez/Tensión muscular*

La generación de tensión muscular contempla varios procesos y grandes cantidades de energía e involucra procesos tanto energéticos como neurales así como procesos de protección muscular posterior al daño fibrilar (Martin y Coe, 2007).

González-Badillo e Izquierdo (2008), resaltan que la tensión muscular es una respuesta a la cantidad de puentes cruzados actina-miosina del músculo y una pérdida de la tensión se puede dar por la incapacidad de mantener suficientes puentes activos, debido a deficiencias bioquímicas, bloqueos en los procesos contráctiles por inflamación o cierta cantidad de desechos metabólicos en el músculo, o ruptura de miofibrilla.

Posterior al ejercicio, en la fase aguda, es frecuente la presencia de un aumento en el grosor muscular, esto según González-Badillo e Izquierdo (2008) debido al movimiento de fluido desde el espacio vascular hacia los músculos como respuesta normal en la fase de regeneración debido al daño causado por la actividad. En un estudio realizado por Ahtianen et al. (2002), posterior a un ejercicio de fuerza (5 series de prensa pierna y cuatro de sentadilla a 10 repeticiones máximas de intensidad), se produjo una disminución en la fuerza, aumento de lactato sanguíneo y disminución en la actividad electromiográfica. Lo anterior se asoció a cambios agudos en el volumen plasmático y a un aumento del grosor muscular. Por lo que la fatiga aguda puede estar relacionada con factores de tipo neural o metabólico, a esto debe agregarse los cambios en la estructura muscular (González-Badillo e Izquierdo, 2008).

González-Badillo e Izquierdo (2008), mencionan que la tensión muscular puede variar con el ejercicio físico dependiendo del grado de entrenamiento, ejercicio y varía también en diferentes tipos de fibras musculares y en diferentes músculos.

Se ha demostrado que el tono y la rigidez muscular, a través de los componentes elásticos, se ve alterado por el entrenamiento o el ejercicio lo cual puede suceder en deportes como ciclismo, ultra maratón y esquí, en los cuales el ejercicio prolongado causa daño muscular y en el proceso alcanzan la depleción de glucógeno (Millet y Lepers, 2004).

## **2.8 Fatiga neuromuscular:**

Los mecanismos de fatiga neuromuscular son complejos, con muchas variables a tomar en cuenta, puede ser periférica, relacionada al propio músculo, así como central la cual se refiere al sistema nervioso. Esta fatiga también depende del ejercicio realizado y las condiciones del mismo, duración, intensidad, grupos musculares implicados, edad, sexo, condición física, entrenamiento y del ambiente como calor y humedad. Por lo anterior no ha sido posible y es inadecuado referirse a un único responsable de producir la fatiga neuromuscular (Méndez-Villanueva y Bishop, 2008; Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

La fatiga puede ser vista desde muchos puntos, por ejemplo puede verse como una disminución o fallo en procesos como generación de fuerza o potencia (Millet y Lepers, 2004), percepción o sensación de cansancio (Kayser, 2003), reducción en el impulso nervioso o en la activación muscular (Gandevia, 2001), dificultad en la realización de tareas o actividades específicas (Chaudhuri y Behan, 2004), o el punto o momento en el cual la materia se rompen por carga o estrés (Martola et al., 2006) o bien a disminuciones en el rendimiento o función muscular (Abbiss y Laursen, 2005). La fatiga no se puede ver solamente como un punto final sino un proceso que aumenta de manera gradual a partir de la progresión del ejercicio en el tiempo o intensidad.

Según Schweltnus (2007), es común observar calambres musculares asociados al ejercicio que son un efecto de la fatiga. En ejercicios intensos se provoca una combinación entre elevación de la actividad excitatoria del huso muscular y un menor efecto inhibitor del órgano tendinoso de Golgi, lo que provoca una actividad sostenida de las neuronas motoras, causada por una elevada actividad espinal, se presenta como una fasciculación muscular. Por lo que sería una explicación de que la fatiga puede presentarse a nivel central así como periférica.

La fatiga central puede producirse en estructuras como neuronas y médula espinal, debido a procesos inhibitorios en la aferencia o alteraciones en las neuronas motoras, también darse por variables psicológicas y motivacionales así como el entrenamiento mental y la capacidad para continuar la actividad con dolor (Plowman y Smith, 2014).

La fatiga periférica puede ocurrir en alteraciones de la conexión neuromuscular, fallas en la transmisión nerviosa, depleción de neurotransmisores, dificultades en los

receptores en la placa motora, alteraciones en la excitación del sarcolema y túbulos T o una incapacidad del retículo sarcoplasmático de liberar calcio suficiente, también puede ser una modificación bioquímica o metabólica (Plowman y Smith, 2014).

Desde un punto de vista bioquímico la fatiga puede explicarse desde dos aristas, la ausencia o la acumulación. La ausencia es la depleción de sustancias o fuentes energéticas como calcio, potasio, glucógeno, fosfocreatina entre otros, por otro lado la acumulación se explica por metabolitos que no permiten la contracción muscular como el lactato, iones de hidrógeno, fosfato, la depleción de electrolitos o deshidratación intracelular, entre otros. Debe verse como un resultado de ambos procesos, si consideramos que durante el ejercicio se presentan ambos panoramas (Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Según los autores las causas de la fatiga neuromuscular, basándose en procesos metabólicos y celulares, en ejercicios de intensidad moderada a alta en condiciones submáximas y de larga duración, como lo es un maratón, son los siguientes: depleción de glucógeno, acumulación de  $H^+$ , inhibición de la glucólisis, disminución de  $Ca^{2+}$  liberado por el retículo sarcoplasmático, interferencias con la captación  $Ca^{2+}$  de por la troponina (Plowman y Smith, 2014).

Alonso y Uribe (2001), mencionan que el sobreuso muscular puede resultar en una caída transitoria de los niveles de glucógeno muscular, los cuales según sus estudios son menores 24 horas posteriores a la actividad que aquellos que se evaluaron inmediatamente posterior a la actividad que consistía en ejercicio de componente excéntrico.

A lo anterior se le puede agregar la fatiga central la cual durante ejercicios prolongados sugiere ser la responsable de una alteración en neurotransmisores (relación serotonina - dopamina), asociado con reducciones en el reclutamiento de moto neuronas y la sensación de cansancio. Este tipo de fatiga (central), adquiere muchísima importancia cuando de ejercicios en ambientes calurosos se trata (Nybo y Nielsen, 2001).

### *2.8.1 Dolor Muscular de Inicio Retardado*

El Dolor Muscular de Inicio Retardado (*DOMS: Delay Onset Muscle Soreness*) es conocido también como dolor muscular post esfuerzo de aparición tardía, dolor

muscular de aparición tardía o agujetas. Se refiere a una consecuencia de la sobre excitación muscular característico como una respuesta a ejercicios prolongados. Existen dos tipos de dolor muscular, el inmediato y el tardío, según Plowman y Smith (2014), el inmediato es el que se presenta durante e inmediatamente posterior al ejercicio y se prolonga durante horas, es provocado por la estimulación de los receptores del dolor por el  $H^+$  asociado por incrementos en los niveles de ácido láctico.

Por un lado el DOMS se caracteriza por dolor muscular, palpitations musculares, sensibilidad aumentada y rigidez mecánica, estos signos y síntomas aparecen 8 horas posteriores a la actividad, alcanzan su máxima intensidad 24-48 horas posteriores y normalmente se reducen a las 96 horas (Byrne et al., 2004). Los dos factores que desempeñan un rol fundamental en la aparición de DOMS son la inflamación y el daño muscular (Plowman y Smith, 2014). Los ejercicios y acciones excéntricas son el principal factor de daño muscular (Byrne et al., 2004).

El mecanismo y etiología de la aparición del DOMS ha sido descrita por múltiples autores (Armstrong, 1984; Byrne et al., 2004; Cheung et al., 2003; Smith, 1991). Los autores anteriores hipotetizan tres teorías que combinadas podían ser la causa de este fenómeno: trauma mecánico, daño muscular e inflamación.

Los eventos que producen DOMS tienen según los autores (Armstrong, 1984; Byrne et al., 2004; Cheung et al., 2003; Plowman y Smith, 2014; Smith, 1991) una secuencia, la cual se presenta a continuación: primeramente durante esfuerzos intensos a los cuales no se está adaptado, y aún más con el elemento excéntrico incluido, provoca una interrupción de proteínas estructurales en las fibras musculares, especialmente en las líneas Z de los sarcómeros. Al mismo tiempo, el daño ocurre en el tejido conectivo de las uniones músculo tendinoso. Segundo, la provocación de un daño en el sarcolema, conlleva una acumulación de  $Ca^{2+}$ , que causa una inhibición de la producción de ATP y causa una pérdida de la homeostasis ya que el ATP es necesario para retornar al calcio a su lugar de almacenamiento. Un aumento en la cantidad de calcio provoca degradación de las líneas Z (alteración del cito esqueleto del sarcómero), troponina y tropomiosina que lleva posteriormente a una muerte de tejido. Tercero, el daño estructural provoca procesos inflamatorios y activación del sistema inmune, el líquido o fluído se traslada al músculo y causa edema. Por último, la acumulación de subproductos y desechos de la

muerte celular y la respuesta inmune, además del aumento en la presión provocada por el edema, estimula los receptores de dolor en sus terminaciones nerviosas.

Por otro lado investigaciones recalcan el rol del estrés oxidativo (desequilibrio celular por exceso de radicales libres) (Ascensao et al., 2008), bradicinina (aumenta niveles de calcio) (Murase et al., 2010) y limitación en el flujo sanguíneo (Umbel et al., 2009) como posibles causantes del proceso que conlleva al DOMS. Uno de los errores más grandes y mitos acerca del DOMS es que una causa del mismo es la acumulación de ácido láctico, las investigaciones al respecto indican que las personas que sufren el síndrome de McArdle (quienes no producen ácido láctico), también sufren DOMS, adicionalmente se conoce ampliamente que la vida media del ácido láctico en el músculo es de entre 15-20 minutos y desaparece por completo posterior a una hora (Plowman y Smith, 2014).

El daño muscular por su parte provoca una disminución en la función, especialmente en ejercicios con componente excéntrico, este daño provoca pérdida en la fuerza, potencia y desempeño. Afecta a su vez la capacidad de mantener contracciones con patrones anormales de reclutamiento y altera la mecánica articular y el rango de movimiento de las mismas (Plowman y Smith, 2014). Lo anterior provoca que el cuerpo reclute músculos no utilizados con frecuencia para una función en específico como medio compensatorio de la pérdida de función de la musculatura principal (Cheung et al., 2003).

El tiempo en el que se recupera la función completa varía según la actividad, por ejemplo, posterior a un protocolo de ejercicio excéntrico provoca una disminución de 30-40% de la fuerza de los extensores de la rodilla inmediatamente posterior a la actividad, recuperando su función al 95%, 7 días posterior a la actividad (Byrne y Eston, 2002). Por otro lado otro protocolo de ejercicio excéntrico provoca disminuciones en la línea base de fuerza de un 57% inmediatamente después del ejercicio, recuperándose a los 5.5 días a un 33% debajo de la línea base (Sayers y Clarkson, 2001).

### *2.8.2 Métodos de medición neuromuscular*

Durante la fatiga, las sensaciones son debilidad, dolor, cansancio y disminución de intensidad durante el ejercicio, pero es necesario un método de medición objetivo para

poder establecer o cuantificar la fatiga. El uso de muchos métodos para la valoración de esta variable a través del tiempo hace que la información disponible no se pueda extrapolar de un estudio a otro (Méndez-Villanueva y Bishop, 2008).

Los métodos de medición deben ser utilizados basándose en diferentes aspectos que pueden influir en la valoración de la fatiga neuromuscular, por ejemplo, Méndez-Villanueva y Bishop, (2008) mencionan los siguientes: cómo y cuándo se valoraría, cantidad de músculos o grupos musculares, tipo de contracción requerida, lugar y tipo de estimulación, protocolo utilizado si induce o no a la fatiga, si necesita, tiempo destinado.

#### *2.8.2.1 Fuerza*

Para la medición de la función dinámica muscular se ha utilizado ampliamente la evaluación llamada 1RM, la cual consiste en la realización de una contracción máxima voluntaria (CMV), pero venciendo una resistencia. El CMV se refiere a la fuerza estática (Plowman y Smith, 2014). Las desventajas de este método en la medición de fatiga neuromuscular es que el riesgo de lesión al intentar realizar una prueba máxima incrementa cuando las fibras musculares no están preparadas para el esfuerzo, además que mide la habilidad de un grupo muscular de vencer una resistencia y no así de musculatura aislada.

#### *2.8.2.2 Resistencia muscular*

La evaluación propuesta por Plowman y Smith (2014), consiste en la realización de repeticiones a un porcentaje inferior al 1RM, por ejemplo, 12 repeticiones a un 60% del 1RM de cada una de las personas. Evaluando la CMV, por ejemplo se le pide al sujeto que realice una presión a un dinamómetro al 50% del CMV durante 90 segundos.

#### *2.8.2.3 Potencia*

Las evaluaciones más frecuentes utilizadas para la medición de la potencia en deportistas cuyo deporte utiliza mayoritariamente el tren inferior, son saltos aislados en plataformas electrónicas como *Squat Jump* (SJ), el *Counter Movement Jump* (CMJ) y protocolos de resistencia como saltos consecutivos al estilo de CMJ durante 15 o 30 segundos de duración, para obtener el porcentaje de cambio de la media de los primeros 5 saltos a los últimos 5 saltos. Este tipo de evaluaciones brindan información funcional

de la potencia medida en milisegundos (tiempo de vuelo) y centímetros (altura de los vuelos).

#### *2.8.2.4 Electromiografía*

En una contracción muscular se puede adquirir información acerca de la actividad eléctrica del músculo mediante la técnica llamada electromiografía (EMG) (Plowman y Smith, 2014). Es el método hasta el momento más utilizado para medir la función neuromuscular, lo anterior según Izquierdo et al. (2008).

El grado de activación muscular se puede medir mediante electrodos de superficie o de aguja. La intensidad de la señal brinda información de manera indirecta de la activación eléctrica muscular y se relaciona con la cantidad de unidades motoras reclutadas. En estudios de fatiga según Izquierdo et al. (2008), se utiliza el dato del nivel de intensidad de la señal eléctrica como un factor predictor de fatiga.

Puede ser utilizado para evaluar el estado nervioso y la conducción nerviosa y la conducción intramuscular. Puede realizarse en reposo o en movimiento voluntarios (Plowman y Smith, 2014). Una desventaja del equipo es que brinda información acerca de la conducción nerviosa y no así de la función mecánica como tal.

#### *2.8.2.5 Tensiomiografía*

La tensiomiografía es una herramienta de evaluación, desarrollado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Ljubljana (Eslovenia), a principios de los años 1990 con el objetivo de evaluar el rigidez muscular en los pacientes que presentaban patologías de origen neuromuscular (Rodríguez-Matoso et al., 2010).

Es una forma de evaluación sumamente sencilla ya que no requiere ningún esfuerzo por parte del sujeto que forma parte de la evaluación lo que le da un carácter no invasivo a esta prueba. Su utilidad a nivel deportivo permite la transferencia con el trabajo ya estipulado por el entrenador y determinan resultados sumamente precisos (García-Manso et al., 2010).

Mide los cambios que se producen en el músculo cuando se provoca de manera externa una contracción involuntaria muscular por un estímulo eléctrico. El parámetro que registra el sensor de la tensiomiografía nos permite saber el desbalance muscular

que se producen en grupos musculares, así como la diferencia entre extremidades (García-Manso et al., 2012). Nos permite también diferenciar el tipo de fibra muscular con la que estamos lidiando ya sea blanca (rápida) o roja (lenta) (Gasparini et al., 2012), también utilizado en el estudio de la fatiga y rigidez muscular de deportistas de diferentes disciplinas como lo son el voleibol y el triatlón (Rodríguez-Matoso et al., 2010; Rusu et al, 2013; Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros, 2012; Tous-Fajardo et al., 2010) así también utilizado en estudios sobre la atrofia muscular (Rusu et al., 2013).

Es común que muchas de las evaluaciones neuromusculares realizadas actualmente cuentan con un factor subjetivo determinante, las cuales van a depender del criterio personal del profesional por lo que parte de la información que estas brinden puede que no sea real y que esta sea parte de la razón por la cual toma mucho más trabajo llevar a cabo un tratamiento eficiente. La tensiomiografía brinda resultados inmediatos y objetivos sobre el estado neuromuscular de los individuos, por lo tanto se tienen parámetros reales con los cuales trabajar para plantear un tratamiento más adecuado, sumado a esto que es una manera muy efectiva de retroalimentación al terapeuta para saber si el tratamiento planteado al paciente está teniendo efecto o si se deben hacer ligeras modificaciones para llegar a cumplir los objetivos terapéuticos y personales de cada paciente.

Aplicar el método de evaluación de la tensiomiografía es algo sumamente sencillo ya que solo requiere de un protocolo establecido, y tiene la ventaja de que el sujeto evaluado no necesita la realización de ningún esfuerzo físico por lo tanto puede ser aplicable a casi cualquier persona sin interferir en sus actividades diarias (García-Manso et al., 2010).

Este método novedoso permite observar de una manera cuantificable los desbalances musculares tanto de grupos agonistas y antagonistas así como de la lateralidad (diestro, zurdo). Esto aplicado en el ámbito deportivo es útil ya que los desbalances musculares que tengan un valor significativo pueden causar lesiones musculares a los deportistas. El atleta deberá disminuir el rendimiento para recuperarse de la lesión y será una baja en su equipo, por lo tanto con este método se tiene la posibilidad de ahorrar tanto al deportista como el equipo en el cual compite. La evaluación con la tensiomiografía permite realizar un plan terapéutico preventivo que respete el principio de individualidad de cada atleta.

Adicionalmente este método brinda información sobre la respuesta muscular a las diferentes cargas de entrenamiento como lo son la fuerza, resistencia, velocidad, flexibilidad, también la fatiga y el grado de activación muscular (García-Manso et al, 2010).

Una de las ventajas de la tensiomiografía es que nos permite evaluar de manera específica los músculos más superficiales dándonos parámetros reales sobre los cuales trabajar en estos, sin importar el objetivo que se proponga ya sea como forma de evaluación, tratamiento o para futuras investigaciones. (García-Manso et al., 2010)

Para que se realice una evaluación correcta la posición debe asegurar una postura de relajación del músculo a evaluar para lo cual se debe colocar soportes tipo almohadilla que nos permitan lograr mantener la articulación en reposo y no afecten la evaluación, ya que en estudios previos se evidenció que el cambio en la angulación de articulaciones (rodilla), afecta la activación muscular (Djordjevic et al., 2012); los electrodos (adhesivos de plata o cloruro de plata pregelificado, diámetro de aproximadamente 1 cm) deben encontrarse entre 3 y 5 cm de distancia entre sí (Simunic, 2003; Rodríguez-Matoso et al., 2010) y deben colocarse en el vientre muscular y a duración del estímulo eléctrico debe de ser estándar de 1 milisegundo (ms) ya que de otra manera se altera el tiempo de reacción (Knez y Valencic 2000). Y se debe colocar con el sensor de manera perpendicular al vientre muscular (García-Manso et al., 2010; Krizaj et al., 2008), de esta forma se detecta modificaciones en el diámetro del músculo cuando realiza una contracción con estímulo involuntario. El sensor tiene una presión inicial de 0.2 N/mm (entre 0.1 y 0.5 N/mm) (Ditroilo, Smith, Fairweather, Hunter, 2013; Rodríguez-Matoso et al., 2010).

La contracción es una respuesta a una corriente monofásica, cuadrangular y bipolar, la duración de la misma es de 1.01-1.15 ms (Dahmane et al., 2001). Según el protocolo se produce un aumento progresivo y creciente de la intensidad de 10 mA hasta que se produzca la máxima intensidad en la respuesta, aproximadamente dentro de un parámetro de 40 and 70 mA (Ditroilo et al., 2013). Para evitar los procesos de fatiga muscular se deben dar periodos de descanso de 10s cada vez que se requiera incrementar el amperaje. (Ditroilo et al., 2013; Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros, 2012).

Es necesario seguir fielmente un protocolo previamente establecido para cada evaluación. (García-Manso et al., 2010) ya que se logró comprobar que una diferencia en la colocación del sensor y electrodos pueden dar alteraciones en los diferentes puntos evaluados por parte del aparato. Así mismo no ha sido investigada la credibilidad de un estudio que es realizado por una sola persona evaluadora de la tensiomiografía, ya que la información obtenida dependerá de la habilidad para colocar el aparato en el punto adecuado (Šimunic, 2003)

En cuanto a la información recaudada por parte del sensor que se va a representar en una figura posterior a la exposición del músculo a una contracción muscular podemos dividirlo en cuatro intervalos donde el primero representa el tiempo de reacción del músculo que generalmente oscila entre los 20 y 60 ms; el segundo intervalo nos va a presentar el punto máximo de deformación del músculo: el tercero se va a producir una estabilización de la respuesta para iniciar con el cuarto intervalo que va a mostrar un descenso de la contracción muscular (García-Manso et al., 2012).

#### *2.8.2.6 Parámetros obtenidos bajo el método tensiomiográfico*

El desplazamiento radial muscular ( $D_m$ ): “viene dado por el desplazamiento radial del vientre muscular expresado en milímetros. Representa y evalúa el ‘stiffness’ (rigidez) muscular” (Valencic et al., 2000; Dahmane et al., 2005; Krizaj et al., 2008). Valores bajos refieren un aumento de la rigidez muscular y valores elevados indican falta de tono muscular, disminución en la rigidez o fatiga (Rodríguez-Matoso, 2013).

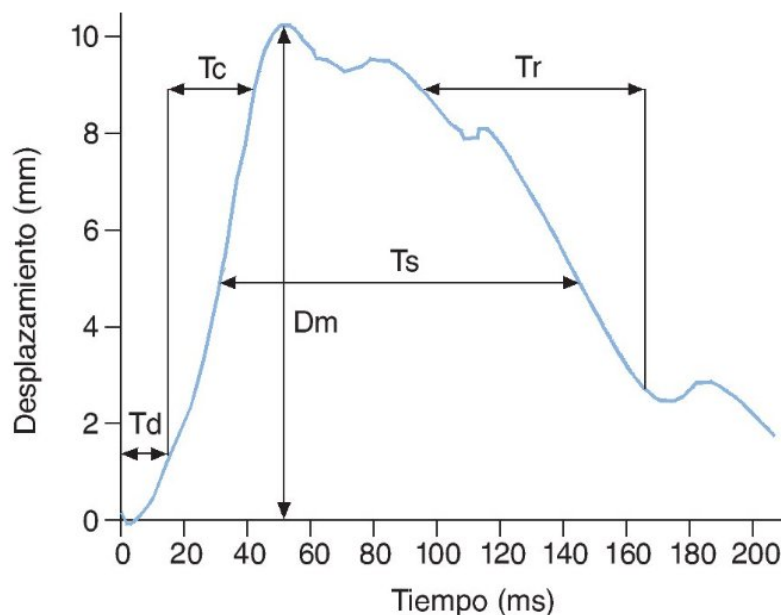
El Tiempo de reacción (retardo o activación -  $T_d$ ): “representa el tiempo que tarda la estructura muscular analizada en alcanzar el 10% del desplazamiento total observado, tras una estimulación” (Dahmane et al., 2005).

El tiempo de contracción muscular ( $T_c$ ): “determinando el tiempo que transcurre desde que finaliza el Tiempo de reacción (10% de desplazamiento radial muscular) hasta que alcanza el 90% de la deformación máxima”. (García-Manso et al., 2010). Puede determinar el tipo de fibra predominante en el músculo, una disminución del tiempo de contracción se relaciona a un aumento de fibras tipo II, un aumento a la presencia de fibras tipo I, un incremento en la velocidad de contracción puede indicar una pérdida de la fuerza muscular (Rusu et al., 2013).

El Tiempo de sustentación ( $T_s$ ), representa, “el tiempo teórico que se mantiene la contracción. En la TMG se calcula determinando el tiempo que transcurre desde que la deformación inicial alcanza el 50% de su valor máximo, hasta que los valores de deformación, durante la relajación, vuelven a valores de un 50% de la deformación máxima” (García-Manso et al., 2010).

El Tiempo de relajación ( $T_r$ ) “aporta información sobre los niveles de fatiga, de forma que valores elevados de este parámetro, respecto a los normales para el sujeto evaluado, indican potenciales estados de fatiga” (García-Manso et al., 2010).

La velocidad de contracción o velocidad de respuesta ( $V_c$  o  $V_r$ ) “representa la magnitud de la deformación radial en el tiempo, Los valores de  $V_r$  serán más bajos en deportistas de resistencia, los cuales poseen un elevado porcentaje de fibras tipo-I, y aumentará entre deportistas de potencia y velocidad, que predominan las fibras tipo II” (Rodríguez-Matoso et al., 2012).



**Imagen 1.** Respuesta muscular de un voleibolista de playa a 110 mA, la cual grafica los valores tensiomiográficos (Tomado de García-Manso et al., 2010).

### 2.8.2.7 Datos de Tiempo de Contracción y desplazamiento radial muscular de estudios similares

Se ha descrito ampliamente la utilidad de la tensiomiografía en la cuantificación de la fatiga, por ejemplo Krizaj et al. (2008), encontraron que los cinco parámetros tensiomiográficos eran muy sensibles a los estados de fatiga, lo que convertía a la Tensiomiografía en un instrumento útil para este fin, describiendo la fatiga como un aumento en los valores de desplazamiento radial muscular y el tiempo de relajación (Merletti et al., 1995).

Los valores tensiomiográficos cambian según la actividad y el deporte del participante, por lo que el valor de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular, va a ser menor o mayor dependiendo del tipo de atleta y condición en el tiempo o momento de medición. Usualmente deportes de potencia y velocidad tienen valores en el músculo recto femoral de desplazamiento radial muscular, los cuales oscilan entre 4 y 8mm y bajos valores de tiempo de contracción muscular (12-20ms), deportes de intensidad intermitente como el fútbol tienen valores medio de ambas variables, un tiempo de contracción muscular de aproximadamente 26-30 ms (Alentorn-Geli et al., 2014; Álvarez-Díaz et al., 2014a; Álvarez-Díaz et al., 2014b; Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros y Casais, 2012; Rey, Lago-Peñas y Lago-Ballesteros, 2012) y un desplazamiento radial muscular de 8-12 mm. En deportes de resistencia el tiempo de contracción muscular aumenta a más de 35 ms y el valor de desplazamiento radial muscular es de aproximadamente 7-9 mm (García-García, 2013; García-García, Hernández-Mendo, Serrano-Gómez y Morales-Sánchez, 2013).

La respuesta de los parámetros neuromusculares varía dependiendo del estímulo dado, por ejemplo Carrasco et al. (2011) evaluaron el recto femoral de 12 sujetos sanos previo y posterior a una sesión de ejercicio intenso (cicloergómetro, 2 min a pico  $VO_2$  máx), y hallaron diferencias expresadas en una disminución del desplazamiento radial muscular, García-Manso et al. (2012), utilizando un ejercicio de fuerza del miembro superior (curl de bíceps 8x15x10 kg y 5x3x30 kg), encontraron una disminución del desplazamiento radial muscular y Tiempo de Recuperación. Con base en lo anterior, se puede indicar que este comportamiento lo provoca estímulos breves e intensos, reflejados como un aumento en la rigidez muscular.

Debido a que este medio de medición de los valores neuromusculares es relativamente novedoso, no existe una base fuerte de parámetros en deportes como

maratón. El único antecedente fue realizado por Loturco et al. (2015), con valores de maratonistas y triatletas profesionales, reportan un tiempo de contracción muscular y un desplazamiento radial muscular de BF de  $19.4 \pm 3.3$  y  $4.23 \pm 1.75$  respectivamente y un tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular de recto femoral de  $22.9 \pm 4$  y  $8.88 \pm 3.45$  respectivamente.

Existen datos también de estudios de resistencia como ultratriatlón y ciclismo, en el primer caso, García-Manso et al. (2011), reportan valores de tiempo de contracción muscular superiores a 30ms tanto en el bíceps femoral (BF) como en el recto femoral previo a la participación en un ultra-triatlón y mayores a 30 ms (BF) y valores posteriores mayores a 35 ms (BF), así como valores de desplazamiento radial muscular previo mayores a 5 mm y mayores a 6 mm posteriores, en el caso del recto femoral un tiempo de contracción muscular previo y posterior mayores a 30 ms y un desplazamiento radial muscular previo y posterior mayores a 6 mm. García-Manso et al. (2011), indicaron cambios significativos en el tiempo de contracción muscular y Tiempo de Reacción y moderada pérdida de rigidez muscular (aumento de valores de desplazamiento radial muscular). En el caso del ciclismo, como deporte de resistencia, datos reportados por García-García (2013), indican que en los músculos evaluados se presentan tiempos de contracción y desplazamientos radiales musculares similares a los reportados en maratón y triatlón. En estos estudios, el recto femoral en ciclistas profesionales en pretemporada presentan un tiempo de contracción muscular de  $45.9 \pm 16.2$ ms, y un desplazamiento radial muscular de  $7.4 \pm 2.8$ mm). En el caso del Bíceps Femoral reportan un tiempo de contracción muscular de  $28.2 \pm 5.2$ ms, un desplazamiento radial muscular de  $5.2 \pm 2.3$ mm). Por otro lado, lo reportado por García-García, Hernández-Mendo, Serrano-Gómez y Morales-Sánchez (2013), diferencian los datos obtenidos del recto femoral durante una pretemporada y durante el periodo competitivo en ciclistas profesionales lo cual nos sugiere que a medida que se entrena la cualidad deportiva de resistencia el tiempo de contracción aumenta y el desplazamiento radial muscular disminuye. Los datos reportados por estos autores son: tiempo de contracción muscular de  $35.9 \pm 6.9$ ms en etapa precompetitiva y  $45.9 \pm 16.2$ ms en competitiva, un desplazamiento radial muscular de  $8.6 \pm 3.0$ mm en etapa precompetitiva y  $7.4 \pm 2.8$ mm en competitiva: En el caso del vasto medial reportan un

tiempo de contracción muscular de  $28.7 \pm 5.5$ ms en etapa precompetitiva y  $44.6 \pm 14.4$ ms en competitiva, en el caso del desplazamiento radial muscular, se reporta  $7.2 \pm 2.3$ mm en etapa precompetitiva y  $8.3 \pm 1.5$ mm en competitiva. Los datos del recto femoral sobrepasan el límite de 30ms en el tiempo de contracción muscular reportado por García-Manso et al. (2011) y Dahmane et al. (2001), como deportes de base aeróbica.

Por otra parte, el deporte más estudiado ha sido el fútbol, debido a la dinámica de la disciplina los datos se diferencian de los eventos de resistencia. Estudios previos en jugadores profesionales en pretemporada por ejemplo (Rojas-Valverde et al., 2015), en el músculo vasto medial se reportan valores de tiempo de contracción muscular de  $25.25 \pm 2.96$  (hemisferio dominante [HD]) y  $25.45 \pm 2.66$  (hemisferio no dominante [HND]) y un desplazamiento radial muscular de  $8.29 \pm 1.49$  (HD) y  $9.01 \pm 1.57$ , por otro lado el recto femoral en tiempo de contracción muscular presenta valores de  $29.95 \pm 1.38$  (HD) y  $30.84 \pm 5.17$  (HND) y un desplazamiento radial muscular de  $8.42 \pm 3.15$  (HD) y  $9.49 \pm 2.43$  (HND). Alentorn-Geli et al. (2014) reporta valores de tiempo de contracción muscular de  $26.8 \pm 5$ ms, y un desplazamiento radial muscular de  $11.2 \pm 20.5$ mm.

Por otro lado Álvarez-Díaz, et al. (2014b) presenta un tiempo de contracción muscular de  $26.6 \pm 4.1$ ms [HD] y  $27 \pm 5.7$ ms [HND] y un desplazamiento radial muscular de  $13.6 \pm 28.9$ mm [HD] y  $8.8 \pm 2.9$ mm [HND]). Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros y Casáis (2012) reportan un tiempo de contracción muscular de  $26.7 \pm 4.7$ ms, un desplazamiento radial muscular  $= 5.5 \pm 1.7$ mm. En futbolistas, Rey, Lago-Peñas y Lago-Ballesteros (2012) presentan valores de tiempo de contracción muscular de  $30.86 \pm 2.91$  y un desplazamiento radial muscular  $11.12 \pm 3.49$ . En el caso de jugadores jóvenes Rusu et al. (2013) reportan un tiempo de contracción muscular de  $22.94 \pm 2.08$ ms y un desplazamiento radial muscular  $6.57 \pm 2.8$ mm. Los datos reportados en el fútbol varían en los de deportes de resistencia, caracterizados por una disminución del Tiempo de Contracción.

De los datos anteriores, se puede analizar cómo el valor de desplazamiento radial muscular en el HND en la mayoría de los casos es mayor comparado al HD, así como los valores de tiempo de contracción muscular son ligeramente menores en el HND

comparado con el HD, lo cual ha sido reportado en estudios anteriores (Kokkonen, Nelson y Cornwell, 1998; Krizaj et al., 2008; Rey, Lago-Peñas y Ballesteros, 2012; Valencic y Knez, 1997). La información anterior se refiere a las simetrías laterales, desarrolladas en el siguiente título.

#### *2.8.2.8 Desbalance Neuromusculares*

Se ha estudiado ampliamente el desbalance de fuerza entre los hemicuerpos de la extremidad inferior dominante y no dominante, con el objetivo de cuantificar las relaciones entre desequilibrios musculares y los riesgos de lesión. Con base en estudios realizados, se demostró claramente que un desequilibrio de fuerza entre los músculos extensores de la rodilla y los flexores de la rodilla, puede ser una de las causas de los trastornos músculo-esqueléticos más comunes (Soderman, Alfredson, Pietila y Werner, 2001; Newton, et al, 2006). Aunado a lo anterior se han reportado diferencias laterales en la fuerza y parámetros neuromusculares relacionados con la dominancia de miembros inferiores (Blache y Monteil, 2012; Ergun, Islegen y Taskiran, 2004).

Debido al gran conocimiento al respecto, se asume con toda firmeza que un desbalance bilateral implica un alto riesgo de lesión. Se considera la existencia de desbalance muscular cuando la diferencia entre el porcentaje de simetría entre un hemicuerpo y otro dista de entre el 10 y 15%, lo que ocasiona un aumento en el riesgo de sufrir una lesión (Croisier et al, 2002; Bennel et al, 1998). Adicionalmente se indica que la pierna dominante presenta más frecuentemente lesiones que la no dominante (Faude et al, 2006).

Otros autores señalan que existen factores ambientales como las irregularidades del terreno (como lo son el peralte, rocas, arena, inclinaciones del terreno o irregularidades en general) que requieren movimientos compensatorios, afectando la mecánica de movimiento de articulaciones lo que podría tener una influencia importante en los desbalances en aspectos biomecánicos entre los hemicuerpos del tren inferior (Carpes, Mota y Faria, 2010). Seeley, Umberger, Clasey y Shapiro (2010), indican que los desbalances más comunes se presentan en las articulaciones de tobillo y rodilla.

Carpes, Mota y Faria (2009), indica que las irregularidades en el terreno causan compensaciones naturales en la mecánica del cuerpo, esto cambia la carga en

articulaciones y huesos de los miembros no dominantes y dominantes. Los autores anteriores rescatan que la velocidad modifica las asimetrías, siendo más simétrica la carrera a mayor velocidad. Se ha señalado con pobreza en sus bases, que la fatiga aguda no altera las diferencias entre el miembro inferior dominante y el no dominante (Brown, Zichock y Hillstrom, 2014).

García-Manso et al. (2011), indica mediante datos tensiomiográficos que existe en la técnica de carrera una predisposición a sobrecargar un miembro inferior sobre otro, destaca que la pierna dominante (HD) suele exponerse a mayor estrés que la no dominante (HND), lo cual puede conllevar un mayor riesgo de lesión, similar a lo expresado por otros autores en estudios sin uso de la TMG, en los cuales la dominancia hemilateral tiene una relevancia epidemiológica de lesión (Bennel et al., 1998; Blache y Monteil, 2012; Croisier et al., 2002; Ergun, Islegen y Taskiran, 2004; Faude et al., 2006).

#### *2.8.2.9 Simetrías laterales*

Cuando se mencionan las simetrías laterales se hace referencia a la comparación del mismo músculo pero en la extremidad opuesta, deben presentarse diferencias superiores al 20% para que deba ser tomada en cuenta como dañina (80-85% de simetría), ya que en deportistas los desbalances elevados o mantenidos en el tiempo pueden ser la causa de futuras lesiones (Rodríguez-Matoso et al., 2012). Así que los datos obtenidos permitirán saber a qué intensidad y frecuencia trabajar un entrenamiento con tal de tener una rápida y efectiva mejora (Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros, 2012). Este valor se obtiene de un algoritmo en el cual el tiempo de contracción muscular aporta un 60%, desplazamiento radial muscular aporta un 20%, Ts, y Td 10% cada una, en cada variable se divide el valor mínimo (derecha o izquierda) en el valor máximo (derecha o izquierda) y se multiplica por el porcentaje de aporte, sumando todas las variables para finalizar.

Estudios en fútbol, en jugadores profesionales saludables en fase de pretemporada reportan diferencias laterales significativas en el recto femoral en valores como desplazamiento radial muscular (8.42mm vs 9.49mm respectivamente) (Rojas-Valverde et al., 2015).

### 2.8.2.10 Simetrías Funcionales

La simetría funcional nos indica el equilibrio que debe haber entre el músculo agonista y el antagonista, las cuales dan una idea de la integridad de una articulación, las diferencias que se admiten como normales no deben superar el 35% (65% de simetría) ya que diferencias tan elevadas van a derivar con seguridad a una lesión (Rodríguez-Matoso et al., 2012).

Cabe rescatar las presencia común de las diferencias en desplazamiento radial muscular del Bíceps Femoral y del recto femoral (Alentorn-Geli et al., 2014), dos de las estructuras fundamentales en el equilibrio articular de rodilla. Estas asimetrías son reportadas por Newton et al. (2001) y Wyatt y Edwards (1981) como las más comúnmente lesionadas en la práctica del fútbol.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de las asimetrías del recto femoral de una participante femenina del presente estudio, la cual aumentó la asimetría lateral 24 horas posterior a la competencia comparado con los valores de la línea base.

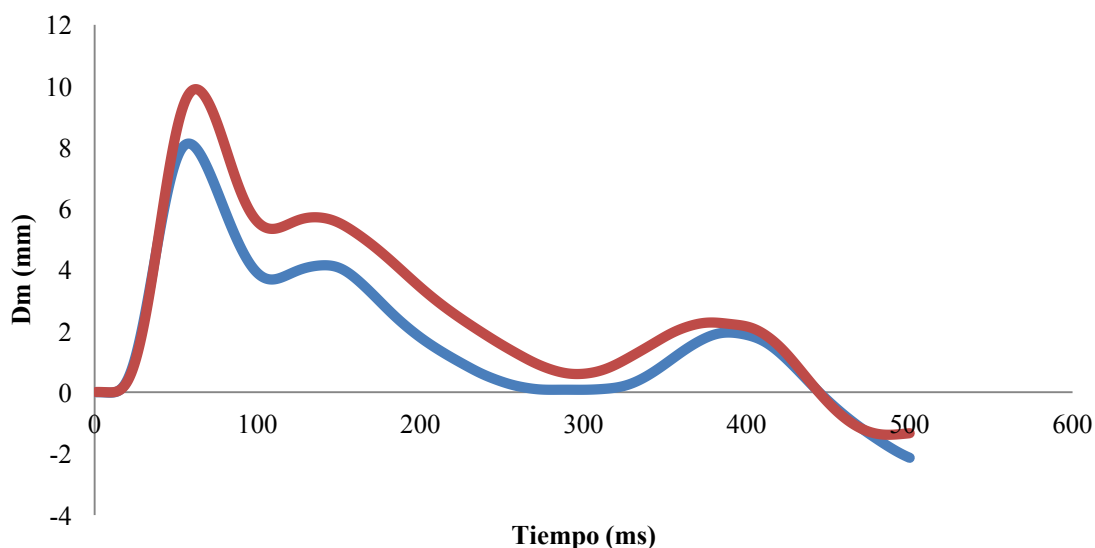


Figura 1. Asimetrías de recto femoral de una participante femenina 24 horas post maratón (Elaboración Propia).

Las evaluaciones en el ejercicio son un pilar fundamental para la prescripción del ejercicio futura, la indagación del estado real del atleta y la identificación de posibles situaciones adversas durante el proceso de entrenamiento. Este estudio brinda la

posibilidad de analizar información de atletas aficionados nacionales en un evento realizado en el territorio costarricense, con el fin de observar los posibles efectos que un maratón en condiciones extremas de calor y humedad pueden generar a nivel neuromuscular.

## **Capítulo III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Participantes:**

Los participantes en el presente estudio fueron 19 en total, para efectos de análisis solamente 17 corredores (10 hombres y 7 mujeres) se tomaron en cuenta (se excluyen dos participantes masculinos, uno que no logra finalizar el evento y otro no realizó la totalidad de las evaluaciones) (edad  $35.82 \pm 7.03$  años, peso  $65.24 \pm 12.21$  kg, talla  $168.44 \pm 10.59$  cm, porcentaje de grasa  $20.81 \pm 7.68$ ,  $VO_{2\text{máx}}$   $52.88 \pm 7.09$  ml/kg/min, masa magra total  $49.63 \pm 11.17$  kg, densidad ósea total  $1.20 \pm 0.08$  g/cm<sup>2</sup>). Para el análisis de los datos, se dividió la muestra en dos grupos, hombres (GH) y de mujeres (GM).

Los criterios de inclusión de los participantes fueron los siguientes: estar involucrado en un entrenamiento para maratón regular, bajo la supervisión de un entrenador profesional en ciencias del movimiento humano, haber tenido una experiencia previa de participación en eventos de resistencia y estar familiarizado con la distancia y cantidad de horas en competición, los mismos realizaron una media de  $3.11 \pm 3.38$  maratones previas al evento con una edad deportiva media de  $9.35 \pm 6.68$  años en la práctica del atletismo, los mismo debieron estar inscritos al evento previo al contacto con los investigadores.

Es importante considerar que los participantes no sufrían de enfermedad o trastorno neuromuscular al momento de las evaluaciones o durante el evento, así como no se manifestaron condiciones neuromusculares patológicas previas. No se tuvo ninguna discriminación/exclusión de participantes en cuanto a tiempo de finalización del evento, los mismos estimaron finalizar en  $229.04 \pm 28.91$  minutos. Todos los sujetos participaron de forma voluntaria y con el respaldo de sus debidos entrenadores y fueron debidamente informados de sus derechos y deberes durante la participación en el estudio con la aceptación debida, mediante un consentimiento informado basado en la Declaración de Helsinki (World Medical Association, 1964).

Los participantes tenían un entrenamiento regular y supervisado. Los corredores aficionados del actual estudio compitieron en un maratón realizado bajo condiciones extremas de calor y humedad con un Índice de Estrés Termal medio durante la competencia de  $28.34 \pm 3.27^\circ$  desde las 5 am hasta las 11 am cuando arribó el último participante del estudio. Las variaciones del Índice de Estrés Termal se muestran en la figura 2. El total de finalistas en el evento fueron 307, de los cuales 234 fueron hombres y 73 mujeres. Las condiciones del recorrido fueron avaladas por la Federación Internacional de Atletismo Aficionado, la misma cuenta con una altitud de 0 a 80 msnm tal como se puede observar en la imagen 2, el recorrido contaba con un retorno a los 21 kms, para completar los 42 kilómetros.

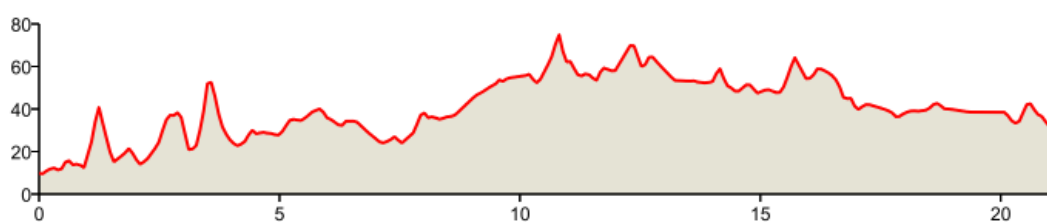


Imagen 2. Altimetría del recorrido de la carrera (Fuente: Tamarindo Beach Marathon, 2015).

Para el presente estudio solamente se tomaron en cuenta los datos de los primeros 40 kilómetros para estandarizar distancias, esto debido a que los últimos 2 kilómetros según Ely et al. (2008) tienden a tener características diferentes a los últimos kilómetros, por la premura de los participantes de llegar a meta.

### **3.2 Instrumentos y materiales:**

#### *3.2.1 Antropometría*

La caracterización de los participantes se realizó a partir de la medición de peso corporal (sensibilidad de  $\pm 0.1$  kg) (Elite Series BC554, Tanita-Ironman®, Illinois, United States of America) y para conocer la talla de los sujetos se utilizó un tallímetro de pared. La composición corporal de los corredores se obtuvo a partir de una absorciometría dual por rayos x (DEXA) con un error de  $\pm 3\%$  (General Electric

enCORE 2011®, software versión 13.6, Wisconsin, United States of America), el cual cuantifica el porcentaje de grasa corporal y masa magra (kg) (ICC=0.6) (Norcross y Van Loan, 2004).

El sujeto se colocó en posición decúbito supino sobre el analizador tipo camilla durante aproximadamente 6:30 minutos sin ningún implemento metálico y en ropa deportiva tal y como lo muestra la imagen 5.



Imagen 3. Evaluación de absorciometría dual de rayos X (Elaboración Propia).

### 3.2.2 Función cardiorrespiratoria

Para la medición del consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2máx}$ ) se utilizó una prueba incremental de aumento cada 2 minutos hasta fatiga volitiva utilizando un analizador de gases ( $VO_{2000}$ , MedGraphics®, Minnesota, United States of América). El equipo cuenta con una precisión de  $\pm 3\%$  de volumen absoluto según el fabricante (Crouter et al. 2006), y el análisis de los datos se realizó por medio del software BreezeSuit®.

Para asegurar el estado de salud del participante y la adecuada función cardiaca se utilizó un equipo para la realización de electrocardiogramas en reposo (Quinton Q-Stress®, 9500 series, Birginham, United Kingdom) con la debida posterior revisión y aprobación de un médico.

Se utilizó un test de ejercicio progresivo máximo hasta la fatiga volitiva, iniciando en 4.5 millas por hora, elevando la intensidad cada 2 minutos, aumentando 1 milla por hora cada etapa, esto hasta alcanzar las 8.5 millas por hora, momento en el que se aumenta la inclinación en un 2% cada etapa sin incrementar más velocidad, estos protocolos similares a los indicados por Martín y Coe (2007). Se utilizó una mascarilla de neopreno con ajuste en parte superior y posterior de la cabeza, con boquilla y mangueras conectadas al analizador directamente (ver imagen 7).



Imagen 4. Equipo evaluación capacidad aeróbica (Elaboración Propia).

### 3.2.3 Variables cinemáticas

Para medir las variables cinemáticas se utilizó un sistema de seguimiento satelital (GPS) (SP PRO X II GPSports®, 15Hz, Camberra, Australia). La validez y la fiabilidad de los dispositivos GPS de 15 Hz han quedado demostradas por Barbero-Álvarez et al. (2009). Según los autores este equipo tiene una alta correlación entre los valores de máxima velocidad y el rendimiento en la prueba de esprines repetidos ( $r^2= 0.87$ ,  $p< 0.001$ ;  $r^2= 0.94$ ,  $p<0.001$ ). De la misma forma, la velocidad máxima acumulada y la velocidad máxima alcanzada registraron un bajo coeficiente de variación (C.V.= 1.7% y C.V.= 1.2%, respectivamente). A su vez, Johnston et al. (2013) reportan una

confiabilidad aceptable a través de una prueba de temporalidad (test, re-test,  $r=0.75$ ). Este instrumento se utilizó para la cuantificación de las variables: distancia recorrida (mts), promedio de metros por minuto, frecuencia cardiaca media (lat/min) y máxima, velocidad media (km/h), impactos (g) y carga corporal (UA). Se utilizó un chaleco color negro de material de neopreno y un sensor de frecuencia cardiaca (T-31, Polar®, Finlandia). Para el análisis de la información se utilizó el software Team AMS® firmware V2.5.4 (GPSports, Camberra, Australia).

La magnitud de los impactos de cada participante se expresa en fuerzas ‘g’. El software Team AMS® contabiliza la cantidad magnitud de impactos por encima de un umbral de 5g, mediante un acelerómetro triaxial. Estos son llamados impactos estresores del desempeño, actualmente existe una clasificación para fútbol de la siguiente manera: Impactos leves (aceleraciones, desaceleraciones y cambios de dirección) (5- 6g), colisiones y contactos con el terreno (cambio de dirección, aceleración o desaceleración muy fuerte) (6-6.5g), impactos moderados-fuertes (contacto con el suelo y colisiones de jugadores) (6.5-7g), impactos fuertes (7-8g), impactos muy fuertes (8-10), impactos severos (+10g) (Carling, Reilly y Williams, 2008). Sin embargo, es importante mencionar que para eventos de maratón donde no existe contacto con otros agentes externos y solamente intervienen fuerzas que el sujeto sufre por sí mismo y su dinámica de carrera, así como superficie y ritmo de carrera, debido a ello, se realizó una categorización iniciando desde un umbral de 2g, de la siguiente manera: 2-2.9g, 3-3.9g, 4-4.9g, 5-5.9g, 6-6.9g y 7-10g.

Todos los movimientos del cuerpo humano en competencia se expresan como carga acumulada. La carga corporal (CC) es la acumulación del grado de cambio en aceleraciones en volumen e intensidad, en tres planos del cuerpo: arriba/abajo (z), lado/lado (y) y delante/atrás (x), expresada por la siguiente fórmula:

$$\text{Magnitud de Impacto (MI)} = \sqrt{((Ac1_n - Ac1_{n-1})^2 + (Ac2_n - Ac2_{n-1})^2 + (Ac3_n - Ac3_{n-1})^2)}$$

Ac1, Ac2 y Ac3 son componentes octogonales de aceleración medidos por direcciones de un acelerómetro triaxial a 100 Hz. Estos valores son medidos en unidades arbitrarias (UA) (Montgomery, Pine y Minahan, 2010; Lovell et al., 2013). Para determinar la CC se suman las MI reportadas por cada impacto mayor a 5g en el periodo de tiempo de medición.

Para la medición de las velocidades, distancias totales, impactos, carga corporal y frecuencias cardiacas, se utilizó un GPS, el mismo se les colocó en la zona cervical en chaleco negro hasta el pecho de material neopreno, se colocó un sensor de frecuencia cardiaca en el apófisis xifoides del esternón (ver imagen 4). Se les colocó 30 minutos previos al inicio de la prueba. Las células se encendieron en ese momento y se inició la recolección de datos, el GPS se utilizó durante la prueba y al finalizar la misma se le extrajo aproximadamente 10 minutos posteriores a cruzar la meta. Posterior a ello, se realizaron los debidos cortes o lapsos de información para analizar solamente el lapso de recolección de datos durante la prueba. Para el presente estudio solamente se tomaron en cuenta los datos de los primeros 40 kilómetros para estandarizar distancias, esto debido a que los últimos 2 kilómetros según Ely et al. (2008) tienden a tener características diferentes debido a la premura del participante por llegar a meta.



Imagen 5. Colocación del chaleco y monitor cardiaco (Elaboración Propia).

#### 3.2.4 Índice de Estrés termal

Para la medición de las condiciones ambientales durante el evento se utilizó la medición del Índice de Estrés Termal (QuestTemp °36, 3M®) que según Ely et al. (2007), es la forma más adecuada de medir el efecto de las condiciones ambientales en eventos de carrera. Lo anterior se obtiene por medio de una fórmula ( $T_{GBH} = 0.7T_b + 0.2T_g + 0.1T_a$ ). De Biasse (2015), menciona que es la integración de la temperatura ambiental ( $T_a$ ), temperatura del bulbo húmedo (humedad) ( $T_b$ ) y de la temperatura del

globo (radiación) ( $T_g$ ). Según el fabricante este equipo tiene una precisión de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  para temperatura y de  $\pm 5\%$  en humedad relativa.

El equipo de medición de estrés termal (ver imagen 6) se colocó en un trípode a 50 metros de la línea de meta desde 30 minutos previos a la salida del evento, durante todo el evento y 8 horas posterior a la llegada del último atleta. Se estabilizó el trípode 10 minutos previos a la primera medición y fue colocado al sol bajo las mismas condiciones en las que se encontraban los sujetos en carrera.



Imagen 6. Equipo para evaluación del estrés termal (Elaboración Propia).

### 3.2.5 Creatin Fosfoquinasa (CPK)

Se evaluó mediante una extracción sanguínea por venopunción de la arteria cubital anterior del miembro superior derecho, por un profesional en microbiología. La muestra sanguínea fue colocada directamente en tubos de cierre hermético especiales para este tipo de extracción (Vacutainer, 9 ml) desde la vena del sujeto sentado. Posterior a ello se dejó coagular en los mismos tubos, para posteriormente ser inmediatamente centrifugados en un equipo para tal fin (Gemmy Industrial Corporation, modelo PLC-05), permitiendo así separar el suero del conglomerado de eritrocitos y colocar el mismo en contenedores tipo Eppendorf (2 mL). El análisis sanguíneo se realizó mediante un método enzimático para la determinación de los niveles de CPK en plasma con un sistema analizador bioquímico Semi-Automático (RT-1904C, Rayto®). Para la consecución de lo anterior se utilizó un analizador bioquímico semi-automático (ver imagen 3). Una vez analizadas, las muestras fueron desechadas utilizando los protocolos correspondientes en el manejo de desechos biológicos-peligrosos.



Imagen 7. Analizador bioquímico de CPK (Elaboración Propia).

### 3.2.6 Variables Neuromusculares Tensiomiografía

Se utilizó un tensiomiógrafo (TMG System 100®, Ljubljana, Slovenia), para determinar la condición muscular base de los participantes. Se utilizó un estimulador eléctrico artificial (TMG-S1, d.o.o., Ljubljana, Slovenia) para generar el estímulo. El sensor Dc–Dc Trans-Tek® (GK 40, Panoptik d.o.o., Ljubljana, Slovenia) con una resolución según el fabricante (TMG-BMC Ltd.) de 2 $\mu$ m. Para la transmisión de los impulsos eléctricos se utilizaron dos electrodos cuadrangulares (5x5 cms) y adhesivos (TheraTrode®, TheraSigma, California, United States of America). Para mantener la rodilla en una posición uniforme y en estado de reposo, se utilizó una almohadilla triangular que provoca una angulación articular de 120°. El Coeficiente de Correlación Interna para recto femoral es tiempo de contracción muscular=0.92 y para desplazamiento radial muscular=0.94 (Benítez-Jiménez, Fernández-Roldán, Montero-Doblas y Romacho-Castro, 2013), respaldado por Rodríguez-Matoso, et al (2010) (tiempo de contracción muscular,  $\alpha$ =0.97; desplazamiento radial muscular,  $\alpha$ =0.92). Para el análisis de la información se utilizó el *software* (TMG 100 *Software* 3.0).

Para la ejecución de la prueba tensiomiográfica del recto femoral y del Vasto medial se debe seguir un protocolo determinado y estricto (Rodríguez-Matoso, 2013). Los

autores señalan que la colocación del sujeto debe ser en decúbito supino, en reposo con la pierna colocada en una almohadilla que permite una extensión de 120 grados y sin realizar ningún movimiento (ver imagen 8), no debe haberse colocado ningún producto tópico previo a la prueba o haber realizado ejercicio extenuante 24 horas previas a la misma. Anterior a la realización de la evaluación se le explica el protocolo a seguir durante la misma al atleta.

Se utilizó un tensiomiógrafo, para determinar la condición muscular base de los sujetos, la información se analizó mediante el software dado por el fabricante y se siguieron los protocolos de medición usados en estudios similares (Álvarez-Díaz et al., 2014a; Perotto, Delagi, Lazzetti, y Morrison, 2011; Ditroilo, Smith, Fairweather, y Hunter, 2013; García-Manso et al., 2010; Rey, Lago-Peñas y Lagos-Ballesteros, 2012; Tous-Fajardo et al., 2010). Se utilizó un estimulador eléctrico artificial, que realiza una descarga de entre 1mA-110mA, con una duración de fase de 1 ms y una forma de onda monofásica cuadrangular (Rey, Lago-Peñas y Lagos-Ballesteros, 2012). Para provocar el máximo desplazamiento mecánico se realizaron incrementos graduales de 10 mA cada descarga (Ditroilo, Smith, Fairweather y Hunter, 2013).

El sensor se colocó en el punto de mayor circunferencia radial (García-Manso, et al., 2010) según la guía anatómica para electromiografía (Perotto, Delagi, Lazzetti y Morrison, 2011), de manera perpendicular (García-Manso, et al., 2012), con una presión inicial de  $1,5 \times 10^{-2}$  N/mm<sup>2</sup> (Ditroilo, Smith, Fairweather, Hunter, 2013) y en un punto equidistante a los bordes internos de dos electrodos cuadrangulares (5x5 cms) y adhesivos, el ánodo se coloca proximal y el cátodo distal (Rey, Lago-Peñas y Lagos-Ballesteros, 2012) los electrodos se encontraban separados entre sí por 3-5 cms en un punto a 2,5 centímetros de cada bordes interno de los electrodos (Tous-Fajardo et al., 2010). Los electrodos fueron reemplazados cada 5 sujetos para mantener la impedancia adecuada.

Por medio de la tensiomiografía se evaluaron el recto femoral y el vasto medial de ambos hemicuerpos. Las evaluaciones tensiomiográficas debido a sus características y protocolos estrictos así como para dar mayor confiabilidad interna se llevaron a cabo por el mismo evaluador.



Imagen 8. Evaluación de VM con Tensiomiografía (Elaboración Propia).

En el presente estudio se realizó un análisis de los efectos neuromusculares de los músculos recto femoral y vasto medial posterior a correr un maratón. Para realizar un análisis adecuado de los efectos de evento sobre el cuerpo, se discriminó si existe alguna diferencia entre los valores previos y posteriores del hemicuerpo dominante (miembro dominante) y hemisferio no dominante (miembro no dominante). Lo anterior se realizó debido a que se ha demostrado en otros deportes la importancia de este análisis realizando la discriminación descrita, debido a las diferencias que pudieran tener en fuerza, resistencia y velocidad (Blache y Monteil, 2012; Ergun, Islegen y Taskiran, 2004; Newton et al., 2006; Soderman, Alfredson, Pietila y Werner, 2001). Lo anterior, fundamentado en que en estudios anteriores se han realizado discriminaciones similares para el análisis deportivo de posibles cambios en el comportamiento neuromuscular tensiomiográfico (Álvarez-Díaz, 2014b; Rojas-Valverde et al., 2015, Rojas-Valverde et al., 2016).

### **3.3 Procedimiento**

Las mediciones se llevaron a cabo 5 sesiones en distintos lugares dependiendo de la sesión de evaluación. Las evaluaciones de control se llevaron a cabo en la sede del laboratorio de evaluaciones del Centro de Investigación y Evaluación en Salud y

Deporte (CIDISAD) de la Escuela Ciencias del Movimiento Humano y Calidad de Vida (CIEMHCAVI), Universidad Nacional de Costa Rica y la evaluación posterior al evento se llevó a cabo en un cuarto aislado en la zona de hospedaje cerca de la meta del evento. Las evaluaciones se realizaron en cuartos controlados a una temperatura que oscilaba entre 20 - 24 °C (similar a lo indicado por Rey, Lago-Peñas y Lagos-Ballesteros, 2012), en cinco sesiones coordinadas con los atletas y los entrenadores de los mismos. Las cinco evaluaciones por logística de los investigadores y con base en la disponibilidad de los atletas, se distribuyeron a conveniencia en dos días consecutivos por cada sesión, en los cuales el atleta no recibió ningún estímulo deportivo o carga de trabajo intensa al menos 24 horas previas a la evaluación (Bandeira, Muniz, Abreu, Nohama, y Borba, 2012) a excepción del día posterior al evento. Todas las evaluaciones se realizaron con las debidas medidas de higiene y privacidad.

El estudio consistió de 5 sesiones de medición de los sujetos distribuidos de la siguiente manera:

### *3.3.1. Sesión 1*

Una primera sesión fue la base para dar a conocer de manera detallada la metodología del estudio a los participantes así como la intervención del equipo de investigación, las responsabilidades y los derechos que se tienen como participante al involucrarse en la investigación. En esta sesión se realizó la lectura y la debida firma del consentimiento escrito basado en la Declaración de Helsinski, en la misma se realizó una explicación de todos los procedimientos y evaluaciones a realizar, así como información previa de advertencia en la participación en eventos de resistencia bajo los antecedentes climáticos de la maratón en estudio. En la sesión se atendieron consultas relacionadas con las intervenciones, también se coordinó los horarios de atención y beneficios de las evaluaciones desde un punto de vista económico, las cuales fueron gratuitas.

### *3.3.2. Sesión 2 (pre 1, duración de 1 hora)*

En la sesión 2 se realizaron evaluaciones para determinar el estado basal o línea base (de ahora en adelante llamada LB) de los participantes en diferentes variables, la misma fue aproximadamente 360 horas (15 días) previas a la maratón. Esta sesión se realizó previo acuerdo con los participantes en las instalaciones del laboratorio CIDISAD de la

Escuela CIEHMCAVI en la Universidad Nacional de Costa Rica. En estas sesiones se evaluaron aspectos como peso, talla, prueba de capacidad aeróbica, electrocardiograma en reposo, densitometría ósea de cuerpo completo y una evaluación tensiomiográfica de recto femoral y vasto medial de ambas piernas. Esta sesión se realizó aproximadamente 15 días previos al evento ya que significaba el momento de descenso de cargas de entrenamiento en el cual el atleta mantenía su estado físico óptimo. A esta sesión hay que añadir una medición de valores sanguíneos de CPK aproximadamente 96 horas (4 días) previas al evento.

### *3.3.3. Sesión 3 (durante el evento)*

En la sesión 3; se realizó el evento (maratón distancia oficial IAAF), durante el mismo se obtuvieron los datos de GPS descritos previo en la metodología. El evento inició a las 5:00 a.m. al nivel del mar. Previo al evento (30 min antes), se equipó a los participantes con el sistema GPS (chaleco y sensor de frecuencia cardiaca). Al finalizar el evento el corredor era dirigido a una carpa de evaluación (recolección de GPS, chalecos y sensores de frecuencia cardiaca) y posterior a la misma, la cual tuvo una duración de 10 minutos, se les brindó la hidratación y atención necesarias. Los participantes durante el evento realizaron ingesta de líquidos y alimento *ad libidum* y portaban la indumentaria deportiva que desearan. No se realizó ninguna intervención en el entrenamiento normal o en los procesos de recuperación posteriores al evento. El objetivo fue realizar una recolección de datos en las condiciones más reales y cotidianas posibles.

### *3.3.4. Sesión 4 (post 1, duración 30 minutos)*

La sesión 4 se llevó a cabo aproximadamente 24 horas (1 día) posteriores a la finalización del evento con previo acuerdo con los participantes en la sede de hospedaje ubicada cerca de la línea de meta. Las mediciones realizadas en estas sesiones fueron las siguientes: medición de niveles sanguíneos de CPK y evaluación de la situación neuromuscular (TMG) de recto femoral y vasto medial de ambas piernas.

### *3.3.5. Sesión 5 (post 2, duración 30 minutos)*

En la evaluación post 2 se realizó la evaluación neuromuscular a partir de la TMG, peso, talla y absorciometría dual completa. La misma se realizó con anterior acuerdo con los participantes en las instalaciones del laboratorio Centro de Investigación y

Diagnóstico en Salud y Deporte (CIDISAD) de Escuela Ciencias del Movimiento Humano y Calidad de Vida (CIEHMCAVI) en la Universidad Nacional de Costa Rica. Estas mediciones se realizaron 144 horas (6 días) posteriores a la finalización del evento. En esta sesión se realizó un registro de la actividad diaria (minutos) de cada atleta entre la sesión 3 y 4, para el debido análisis de esta información se realizaron 3 grupos (tertiles) según la cantidad de actividad realizada en minutos, baja ( $\leq 89.99$  min), moderada (90-179.98 min) y alta ( $\geq 180$  min) (Castillo y Molina, 2009).

### **3.4. Diseño experimental:**

El presente estudio es comparativo, descriptivo y correlacional, de corte transversal.

G1:  $O_{pre1}$   $X_{estímulo}$   $O_{post1}$   $O_{post2}$

G2:  $O_{pre1}$   $X_{estímulo}$   $O_{post1}$   $O_{post2}$

### **3.5 Análisis Estadístico:**

Para presentar cada una de las características de la muestra se implementó estadística descriptiva por medio del cálculo de valores de la media (M) y sus respectivas desviaciones estándar ( $\pm DS$ ). Se comprobó la normalidad de los datos de cada una de las variables mediante la prueba Shapiro-Wilk. Se realizaron comparaciones entre los datos tensiomiográficos por medio de análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA) en sus tres momentos de evaluación (96 hrs previas, 24 hrs posteriores y 144hrs posteriores), utilizado en este caso la técnica de Bonferroni. Se realizó una t-Student de medidas independientes para analizar las diferencias o desbalances entre el HD y el HND en las tres mediciones. También se realizaron correlaciones de Pearson para variables tensiomiográficas y e impactos, velocidades medias de carrera, tiempo total en 40 kms y CoV velocidad.

Se utilizó el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS) (IBM, SPSS Statistics, V. 21.0 Chicago, IL, USA). El nivel de significancia utilizada fue de  $p < 0.05$ .

## Capítulo IV RESULTADOS

En la figura 2 se muestra la variación del Índice de Estrés Termal durante el tiempo de competencia de los participantes.

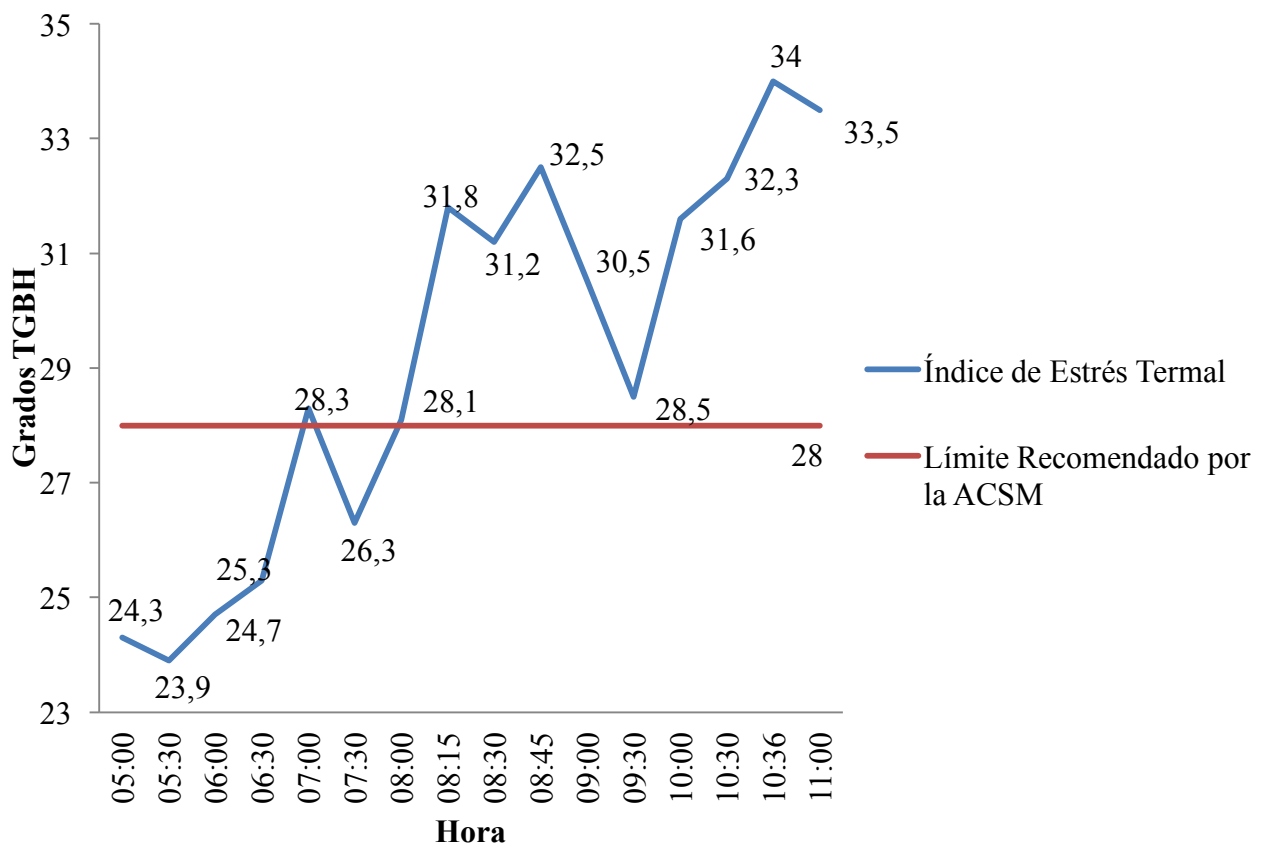


Figura 2. Índice de Estrés Termal del día de carrera y sus variaciones durante la competencia contra los valores límites recomendados por la ACSM (2007), para la realización de ejercicio seguro (Elaboración propia).

En la figura 2, se puede observar las variaciones del índice de estrés termal desde que inició la competencia hasta que arribó a meta el último participante del presente estudio.

En la tabla 1 se describen los valores descriptivos de los participantes, lo que nos permite conocer el estado físico y fisiológico general de cada uno de ellos.

Tabla 1

Valores descriptivos bioquímicos, físicos y fisiológicos, para la caracterización de los participantes.

Variable	General	Hombres	Mujeres
	(n:17)	(n:10)	(n:7)
	M ± DS	M ± DS	M ± DS
Edad (años)	35.82 ± 7.03	33.5 ± 6.98	39.14 ± 6.09
Peso (kg)**	65.24 ± 12.21	72.74 ± 10.23	54.54 ± 3.63
Talla (cms)**	168.44 ± 10.59	175.05 ± 7.58	159 ± 6
Porcentaje de Grasa (%)**	20.81 ± 7.68	16.82 ± 6.07	26.53 ± 6.11
Masa Magra Total (kg)**	49.63 ± 11.17	57.44 ± 6.89	38.48 ± 3.87
Masa Magra HD (kg)**	8.31 ± 2.15	9.8 ± 1.43	6.2 ± 0.66
Masa Magra HND (kg)**	8.37 ± 2.16	9.85 ± 1.48	6.27 ± 0.71
Densidad Masa Ósea (DMO) (g/cms <sup>2</sup> )	1.20 ± 0.83	1.23 ± 0.08	1.17 ± 0.7
VO <sub>2</sub> máx (ml/kg/min)	52.88 ± 7.09	53.85 ± 7.25	51.5 ± 7.17
Tiempo 40K (min)	225.00 ± 37.61	219 ± 37.97	233.57 ± 38.27
Velocidad Promedio (m/s)	2.87 ± 0.42	3.04 ± 0.44	2.65 ± 0.29
CoV Velocidad (%)	11.67 ± 7.39	13.40 ± 7.10	9.21 ± 7.62
Impactos Totales (2-10g)	73777.35 ±	71021.8 ±	77713.85 ±
	8941.69	7505.68	9898.15
CPK 96HRS (UI/L)*	180.69 ±	237.95 ± 137.72	98.90 ± 28.17
	126.25		

CPK 24HRS (UI/L)	1215.48 ± 715.40	1279.27 ± 788.31	1124.35 ± 645.14
------------------	---------------------	------------------	---------------------

Nota: M= Media, DS= Desviación Estándar, HD= hemisferio dominante, HND= hemisferio no dominante, CPK= Creatin Fosfoquinasa, UI/L= Unidades Internacionales por Litro, UA= Unidades Arbitrarias, CoV= Coeficiente de variación de la velocidad. Diferencias significativas mediante la prueba t-Student de medidas independientes entre hombres y mujeres (\*p<0.05, \*\*p<0.01).

La tabla 1 muestra las diferencias significativas existentes entre hombres y mujeres en cuanto a: peso (t= 5.173, p= 0.001), talla (t= 4.657, p= 0.001), porcentaje de grasa (t= -3.236, p= 0.006), masa magra total (t= 6.551, p=0.001), masa magra HD (t= 6.193, p=0.001), masa magra HND (t= 6.637, p=0.001) y CPK 96hrs (t= 2.609, p=0.02).

Existen diferencias significativas entre hombres y mujeres entre las variables de CPK 96 horas previo (t= 2.609, p= 0.020) (hombres= 237.952 ± 137.71 UI/L y mujeres= 98.90 ± 28.16 UI/L) y Porcentaje de Cambio (%Δ) del CPK (t= -2.383, p= 0.031) (hombres= 78.77 ± 10.47% y mujeres= 89.25 ± 5.87%). No existen diferencias entre los valores 24 horas posteriores al evento.

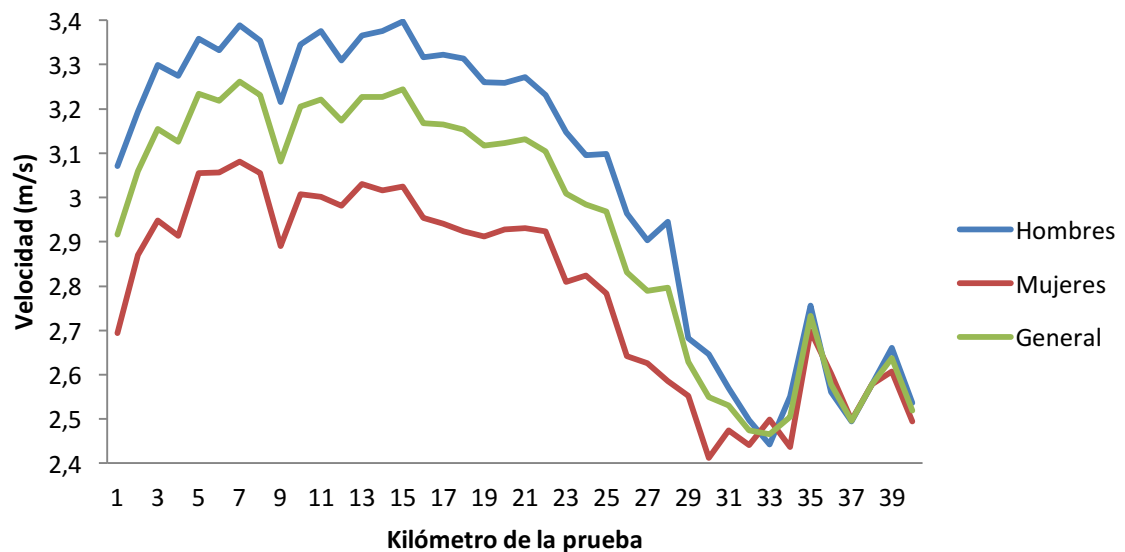


Figura 3. Media de la Velocidad de Carrera de los participantes por kilómetro.

El figura 3, ilustra cómo varía la velocidad de carrera de los participantes durante el maratón en estudio y grafica la disminución del ritmo de carrera posterior a los 20 kilómetros aproximadamente. Al comparar el Coeficiente de Variación Velocidad de los

primeros 20 km ( $3.46 \pm 1.02\%$ ) con los segundos 20 k ( $4.16 \pm 1.55\%$ ) se registró una diferencia estadísticamente significativa ( $t= -3.58$ ,  $p= 0.003$ ). También existe diferencia significativa ( $t= 5.088$ ,  $p= 0.000$ ) entre la velocidad de los participantes de la primera mitad ( $M= 3.17 \pm 0.37$  m/s) de la carrera contra la segunda mitad ( $M= 2.72 \pm 0.49$  m/s). No existen diferencias significativas en la media de la Velocidad de Carrera (hombres= $3.04 \pm 0.44$  m/s y mujeres= $2.64 \pm 0.29$  m/s) o el Coeficiente de Variación Velocidad entre hombres y mujeres.

Tabla 2

Correlaciones de datos cinemáticos y fisiológicos de los participantes del evento de maratón.

VARIABLES CORRELACIONADAS	r de Pearson	Significancia
CoV Velocidad * Tiempo 40kms	0.578	0.015*
Vo2máx * Tiempo 40 kms	-0.593	0.012*
M de Velocidad * Impactos 6-6.9g	0.668	0.003**
M de Velocidad * Impactos 7-10g	0.644	0.005**

Nota: CoV= Coeficiente de Variación, M= Media. \* $p<0.05$ , \*\* $p<0.01$ .

Como se muestra en la tabla anterior existe una correlación positiva significativa ( $r= 0.578$ ,  $p= 0.015$ ) que indica que a mayor coeficiente de variación de la velocidad mayor tiempo de carrera en 40 kms, lo que quiere decir que a mayor variación en la velocidad mayor duración de la prueba. Esto es respaldado por una correlación positiva significativa ( $r= -0.593$ ,  $p= 0.012$ ) entre el  $VO_{2\text{ máx}}$  y el tiempo de carrera en 40 kms, la cual indica que a mayor consumo de oxígeno menor es el tiempo de carrera.

Añadido a las modificaciones en el ritmo de carrera y tiempos de finalización, existe una correlación positiva y significativa que indica que a mayor media de la Velocidad de Carrera (m/s) existe mayor cantidad de impactos en los rangos de 6-6.9g ( $r= 0.668$ ,  $p= 0.003$ ) y 7-10g ( $r= 0.644$ ,  $p= 0.005$ ).

Tabla 3

Cantidad de impactos mayores a 2 gravedades sufridos por los participantes durante el maratón.

Umbral de impacto (fuerzas g)	General M ± DS (n:17)	Hombres M ± DS (n:10)	Mujeres M ± DS (n:7)
2-2.9 g	34448.35 ± 8469.14	32765.50 ± 5873.52	36852.43 ± 11316.37
3-3.9g*	12601.41 ± 10302.54	8563.9 ± 6113.09	18369.9 ± 12688.95
4-4.9g	14995.17 ± 7395.70	16168.2 ± 6601.48	13319.43 ± 8655.55
5-5.9g	7433.82 ± 5387.56	8620.7 ± 4037.95	5738.29 ± 6873.39
6-6.9g	3324.17 ± 5577.56	3705.7 ± 5695.96	2779.14 ± 5805.42
7-10g	974.41 ± 2042.58	1197.8 ± 2336.06	655.29 ± 1654.68
Impactos Totales (2-10g)	73777.35 ± 8941.69	71021.8 ± 7505.69	77713.85 ± 9898.16

Nota: M= Media, DS= Desviación Estándar, N= Número, g= gravedades. Diferencias significativas mediante la prueba t-Student de medidas independientes entre hombres y mujeres (\*p<0.05)

La tabla anterior muestra la cantidad de impactos en fuerzas g, sufridos durante el evento clasificados por zonas de intensidad del impacto, así como los totales de impactos entre 2g y 10g. Cabe destacar que el impacto más alto registrado de un participante fue de 8.5g durante el evento. Los datos muestran que existe una diferencia significativa ( $t = -2.135$ ,  $p = 0.05$ ) entre la cantidad de impactos realizada por los hombres ( $M = 8563.90$ ) y las mujeres ( $M = 18369.28$ ) en la zona 3-3.9g.

Tabla 4

Correlación de valores Cinemáticos, CPK y magnitudes de impacto.

VARIABLES CORRELACIONADAS	GRUPO	R DE PEARSON	SIGNIFICANCIA
CPK 24 hrs POST * Impactos 4-4.9g	Mujeres	0.907	0.005**
M Velocidad * CPK 24hrs POST	Mujeres	0.853	0.015*
M Velocidad * %Δ CPK	Mujeres	0.867	0.012*
M Velocidad * Impactos 6-6.9 g	Hombres	0.695	0.026*
M Velocidad * Impactos 7-10g	Hombres	0.642	0.45

Nota: M= Media, CPK= Creatin Fosfoquinasa, %Δ= Porcentaje de Cambio. \*p<0.05, \*\*p<0.01.

Como se muestra en la tabla anterior, existe en las mujeres una relación significativa y positiva entre la cantidad de CPK 24 horas posteriores con la cantidad de impactos en las zonas 4-4.9g (r= 0.907, p= 0.005). En mujeres, existe una correlación significativa y positiva entre la media de la Velocidad de Carrera y la cantidad de CPK 24 horas posteriores (r= 0.853, p= 0.015). Existe también en mujeres una relación significativa y positiva entre la media de la Velocidad de Carrera y el Porcentaje de Cambio (%Δ) de CPK (r= 0.867, p= 0.012). En hombres también existe una correlación positiva entre la media de la Velocidad de Carrera y la cantidad de impactos en zonas 6-6.9g (r= 0.695, p= 0.026) y así como en zonas 7-10g (r= 0.642, p= 0.045).

Tabla 5

Correlación entre la cantidad de impactos en fuerzas g y el comportamiento del desplazamiento radial muscular del recto femoral a las 24 hrs y 144 hrs posteriores al evento de maratón.

		Momento de Evaluación	2-2.9 g (N=17)	3-3.9g (N=17)	4-4.9g (N=17)	5-5.9g (N=17)	6-6.9g (N=17)	7-10g (N=15)
Dm	24 hrs post			-0.648 (0.005**)			0.494 (0.044*)	0.532 (0.028*)
	144 hrs post			-0.487 (0.047*)				
VM	24 hrs post			-0.487 (0.047*)				
	144 hrs			-0.629		0.583		

Momento de Evaluación	2-2.9 g (N=17)	3-3.9g (N=17)	4-4.9g (N=17)	5-5.9g (N=17)	6-6.9g (N=17)	7-10g (N=15)
post		(0.007**)		(0.014*)		

Nota: Datos expresados en r-Pearson (significancia),  $p < 0.05^*$ ,  $p < 0.01^{**}$ .

La tabla anterior muestra una correlación positiva y significativa entre la cantidad de impactos en el rango de 6-6.9g y 7-10g y el desplazamiento radial muscular del recto femoral en la evaluación 24 hrs ( $r = 0.494$ ,  $p = 0.044$  y  $r = 0.532$ ,  $p = 0.028$  respectivamente). Existe una correlación positiva y significativa entre la cantidad de impactos en la zona 5-5.9g y el desplazamiento radial muscular del vasto medial ( $r = 0.583$ ,  $p = 0.014$ ). Se muestra una correlación negativa significativa la cual indica que a mayor cantidad de impactos en la zona 3-3.9g existe menor desplazamiento radial muscular del recto femoral y menor desplazamiento radial muscular del vasto medial en las evaluaciones 24 y 144 hrs post maratón. No existe correlación entre la cantidad de impactos totales o por zona con comportamientos aumentados o disminuidos del desplazamiento radial muscular en el vasto medial o recto femoral.

En mujeres existe una correlación negativa y significativa entre la cantidad de impactos en la zona 3-3.9g y la media del desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento ( $r = -0.850$ ,  $p = 0.016$ ), así como una correlación positiva significativa entre el desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento y la cantidad de impactos en zona 4-4.9g ( $r = 0.803$ ,  $p = 0.030$ ).

En los hombres existe una correlación positiva significativa entre la cantidad de impactos en zona 7-10g con la media del desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posterior al evento ( $r = 0.636$ ,  $p = 0.048$ ).

Tabla 6

Porcentajes de cambio de valores de CPK y el porcentaje de cambio del tiempo de contracción muscular y Desplazamiento Muscular pre y post maratón.

%Δ CPK (M ± DS)	%Δ de la M del Tc del RF de LB a 24 hrs post (M ± DS)	%Δ de la M del Dm del RF de LB a 24 hrs post (M ± DS)
83.09 ± 10.14	2.97 ± 7.02	6.69 ± 23.41

Nota: M= Media, DS= Desviación Estándar, %Δ= porcentaje de cambio, RF= recto femoral, Dm= Desplazamiento Radial Muscular, Tc= tiempo de contracción muscular, hrs= horas, LB= Línea Base.

El análisis con base en correlaciones de Pearson de los porcentajes de cambio de los valores tensiomiográficos mostrados en la tabla anterior, indican que existe una correlación positiva significativa entre el %Δ de CPK con medias de tiempo de contracción muscular del recto femoral ( $r= 0.682$ ,  $p= 0.003$ ) y una correlación positiva significativa entre el %Δ de CPK con el %Δ de la media de desplazamiento radial muscular del recto femoral ( $r= 0.621$ ,  $p= 0.008$ ). Lo anterior indica que a medida que aumenta el CPK también lo hacen los valores de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular en el recto femoral 24 horas posteriores con respecto a la Línea Base.

En hombres existe una correlación entre %Δ de la media del tiempo de contracción muscular ( $r= 0.733$ ,  $p= 0.016$ ) y el %Δ de la media del desplazamiento radial muscular ( $r= 0.832$ ,  $p= 0.003$ ) con el %Δ del CPK. En mujeres no existe la correlación anterior significativa.

Tabla 7

Porcentajes de cambio de valores de CPK y valores de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular del hemisferio dominante del recto femoral.

%Δ CPK (M ± DS)	%Δ de la M del Tc del RF de LB a 24 hrs post en HD (M ± DS)	%Δ de la M del Dm del RF de LB a 24 hrs post en HD (M ± DS)
83.09 ± 10.14	4.27 ± 10.11	4.97 ± 27.12

Nota: M= media, DS= desviación estándar, %Δ= porcentaje de cambio, RF= recto femoral, Dm= Desplazamiento Radial Muscular, Tc= tiempo de contracción muscular, HD= hemisferio dominante, LB= Línea Base.

Los resultados de la tabla anterior llevaron a un análisis más detallado de la variabilidad del tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular entre las mediciones de LB y 24 horas posterior. Debido a lo anterior se realizaron

correlaciones de Pearson para comparar el %Δ del hemisferio dominante y el hemisferio no dominante entre la evaluación de LB y 24 posteriores y el %Δ CPK.

Este análisis expone una correlación positiva significativa entre el %Δ CPK y el desplazamiento radial muscular del hemisferio dominante ( $r= 0.739$ ,  $p= 0.001$ ), y una correlación positiva significativa entre el %Δ del CPK y el %Δ del tiempo de contracción muscular del hemisferio dominante (LB-24 post) ( $r= 0.488$ ,  $p= 0.47$ ). No existieron correlaciones significativas entre el %Δ del CPK y el %Δ de tiempo de contracción muscular ni con el %Δ de desplazamiento radial muscular en el hemisferio no dominante.

La tabla 6 muestra las variaciones existentes entre el desplazamiento radial muscular y el tiempo de contracción muscular entre hemisferio dominante y hemisferio no dominante de los tres momentos de evaluación (de LB, 24 hrs post y 144 hrs post), por medio de pruebas t-Student de medidas relacionadas, se encontraron diferencias significativas entre el hemisferio dominante y el hemisferio no dominante 24 horas posterior al evento de maratón.

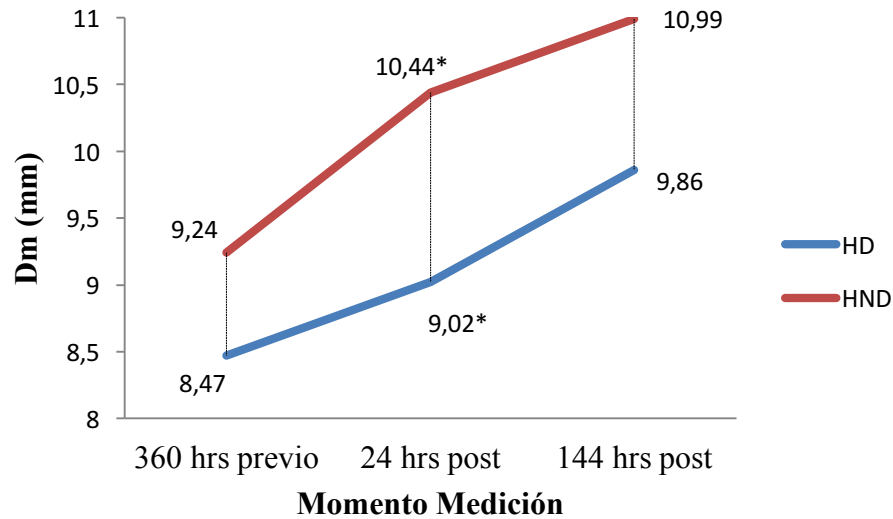
Tabla 8

Valores descriptivos relacionados con la tensiomiografía de los músculos recto femoral y vasto medial y comparación entre hemicuerpos dominante y no dominante en los tres momentos de medición.

Variable TMG- Hemisferio	Músculo	Momento de Medición	M ± DS (n:17)	t (sig.)
Tc HD	RF	LB	27.20 ± 3.49	NS
Tc HND			28.84 ± 3.76	
Dm HD			8.47 ± 2.59	NS
Dm HND			9.24 ± 2.05	
Tc HD	VM	LB	23.01 ± 1.51	NS
Tc HND			23.51 ± 2.50	
Dm HD			7.22 ± 1.52	NS
Dm HND			7.55 ± 1.05	
Tc HD	RF	24 hrs Post	28.52 ± 3.30	NS

Variable TMG- Hemisferio	Músculo	Momento de Medición	M ± DS (n:17)	t (sig.)
Tc HND			29.33 ± 3.12	
Dm HD			9.02 ± 2.15	-2.722 (0.015*)
Dm HND			10.44 ± 2.66	
<hr/>				
Tc HD			23.36 ± 1.83	NS
Tc HND	VM		23.75 ± 2.35	
Dm HD			7.41 ± 1.95	
Dm HND			7.92 ± 1.87	NS
<hr/>				
Tc HD			27.87 ± 3.08	NS
Tc HND	RF		27.96 ± 3.28	
Dm HD			9.86 ± 3.39	
Dm HND			10.99 ± 2.44	NS
<hr/>				
Tc HD		144 hrs Post	23.19 ± 1.91	NS
Tc HND	VM		22.79 ± 2.06	
Dm HD			7.30 ± 1.78	
Dm HND			8.00 ± 2.22	NS

Nota: M= Media, DS= Desviación Estándar, N= Número, HD= hemisferio dominante, HND= hemisferio no dominante, RF= recto femoral, VM= vasto medial, Dm= desplazamiento radial muscular (mm), Tc= Tiempo de Contracción (ms) , LB= Línea Base. p<0.05\*, NS= No Significativo.



Dm= desplazamiento radial muscular, HD= hemisferio dominante, HND= hemisferio no dominante,  $p < 0.05^*$ .

Figura 4. Diferencias entre hemisferios dominante y no dominante relacionados al desplazamiento radial muscular del recto femoral en los tres momentos de medición.

En el figura 4, se muestra el comportamiento de las variaciones en la rigidez muscular del hemisferio dominante y hemisferio no dominante expresada por el desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral en sus tres momentos de medición. En la tabla y la figura anterior se puede observar un aumento en la diferencia del desplazamiento radial muscular 24 horas posteriores al evento de manera significativa ( $t = -2.722$ ,  $p = 0.015$ ), siendo el desplazamiento radial muscular del hemisferio no dominante significativamente mayor al hemisferio dominante. Este comportamiento se evidencia en hombres al comparar hemisferio dominante y hemisferio no dominante del desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral 24 posterior al evento ( $t = -2.374$ ,  $p = 0.042$ ), en el caso de las mujeres las diferencias se encuentran 144 horas posterior al evento en el desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral ( $t = -3.412$ ,  $p = 0.014$ ).

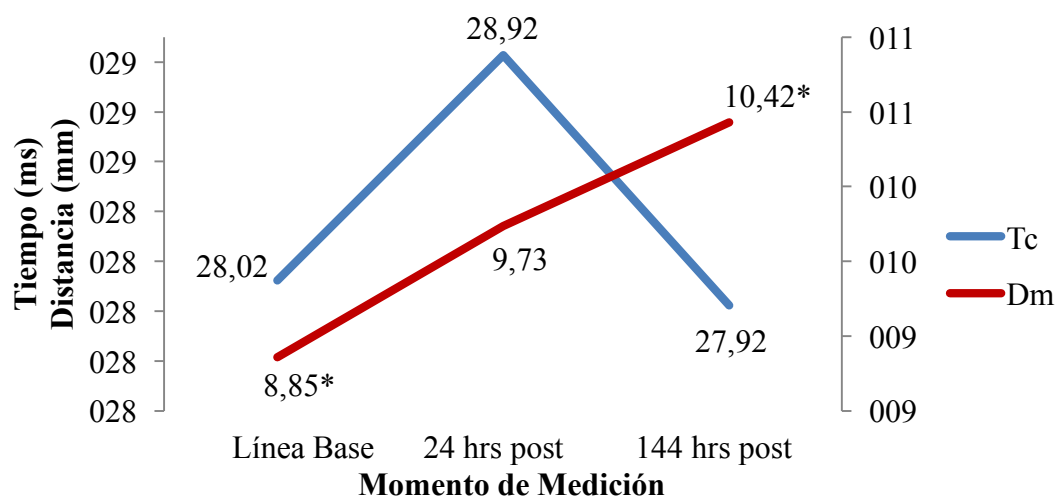
Tabla 9

Comparación por medio de ANOVA de Medidas Repetidas del comportamiento del recto femoral según momento de medición.

	Media Hemisferios (HD+HND)/2 (M ± DS)	Momento de Medición de LB (sig.)	24 hrs Post (sig.)	144 hrs Post (sig.)
Tc	28.02 ± 2.93	LB		
	28.92 ± 2.71	24 hrs Post	NS	
	27.92 ± 2.53	144 hrs Post	NS	NS
Dm	8.85 ± 2.15	LB		
	9.73 ± 2.17	24 hrs Post	NS	
	10.42 ± 2.61	144 hrs Post	0.020*	NS

Nota: RF= recto femoral, Dm= desplazamiento radial muscular (mm), Tc= Tiempo de Contracción (ms), M= Media, DS= Desviación Estándar, LB= Línea Base.  $p < 0.05^*$

Posterior al análisis de varianza se reporta una diferencia significativa entre la medición de desplazamiento radial muscular de la LB comparado con 144 horas posterior al mismo ( $F = 4.427$ ,  $p = 0.020$ ). Siendo la medición de 144 horas posterior significativamente mayor ( $p = 0.044$ ). No se reportaron diferencias por sexo por lo que el comportamiento del tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular entre las evaluaciones es similar.



\* $p < 0.05$ .

Figura 5. Comportamiento tensiomiográfico del recto femoral en tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular según momento de medición.

En la figura anterior se muestra el comportamiento del tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral, en los tres momentos de medición, según estos datos existe una tendencia del desplazamiento radial muscular al aumento constante, por otro lado el tiempo de contracción muscular, pasadas 144 horas del evento se da una tendencia a la recuperación del estado descrito en la LB.

Tabla 10

Comparación por medio de ANOVA de Medidas Repetidas del comportamiento del vasto medial según momento de medición.

	Media Hemisferios (HD+HND)/2 (M ± DS)	Momento de Medición	de LB (sig.)	24 hrs Post (sig.)	144 hrs Post (sig.)
Tc	23.26 ± 1.70	LB			
	23.56 ± 1.98	24 hrs Post	NS		
	22.99 ± 1.71	144 hrs Post	NS	NS	
Dm	7.39 ± 1.18	LB			
	7.66 ± 1.82	24 hrs Post	NS		
	7.65 ± 1.85	144 hrs Post	NS	NS	

Nota: Dm= desplazamiento radial muscular (mm), Tc= Tiempo de Contracción (ms) M= Media, DS= Desviación Estándar, LB= Líne Base.  $p < 0.05^*$

Posterior al análisis de varianza no se registraron diferencias significativas en el tiempo de contracción muscular del vasto medial y tampoco se registraron diferencias significativas en el desplazamiento radial muscular de vasto medial. No se reportan diferencias significativas en tiempo de contracción muscular o desplazamiento radial muscular del músculo vasto medial en los diferentes momentos de medición. No se reportaron diferencias por sexo, por lo que el comportamiento del Tempo de Contracción Muscular y el desplazamiento radial muscular entre las evaluaciones es similar.

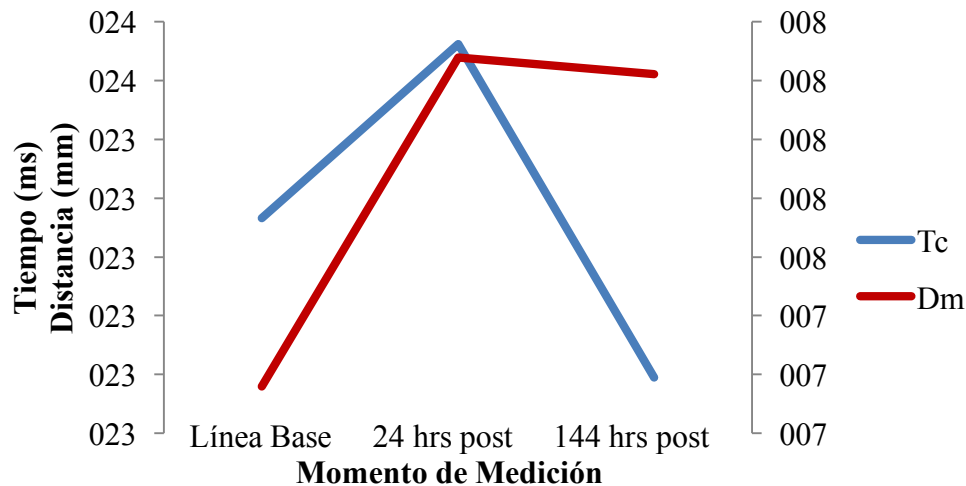


Figura 6. Comportamiento tensiomiográfico del vasto medial en tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular según momento de medición.

En la figura anterior se muestra el comportamiento del tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular del músculo vasto medial en los tres momentos de medición, según estos datos existe una tendencia del desplazamiento radial muscular a un aumento constante, por otro lado el tiempo de contracción muscular, pasadas 144 horas del evento se ha recuperado y disminuido al estado presente en la LB.

En la siguiente tabla se describen la cantidad de minutos de ejercicio físico por disciplina que ejecutaron los participantes entre 24 horas posteriores y 144 horas posteriores al evento. No existen diferencias significativas entre la cantidad de minutos totales de actividad realizada por las mujeres ( $82.95 \pm 31.35$  min) al compararla con los hombres ( $98.09 \pm 31.02$  min).

Tabla 11

Volumen de actividad física realizada por los participantes entre la evaluación 24 horas posteriores y 144 horas posteriores según disciplina deportiva.

Actividad	N	M $\pm$ DS (min)
Natación	17	42.64 $\pm$ 47.83
Ciclismo	17	37.94 $\pm$ 53.06
Carrera	17	68.52 $\pm$ 51.10

Actividad	N	M ± DS (min)
Natación	17	42.64 ± 47.83
Ciclismo	17	37.94 ± 53.06
Total de minutos de actividad	17	149.11 ± 91.14

Nota: M= Media, DS= Desviación Estándar, N= Número.

En la tabla siguiente se muestra el comportamiento de las medias del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular de los músculos recto femoral y vasto medial de los tres grupos, de la cual se puede observar que no existen diferencias significativas entre ellos, pero si una tendencia que indica que aquellos participantes que realizaron un volumen de actividad alto tuvieron Desplazamientos Radiales Musculares y Tiempos de Contracción mayores no significativos que los de bajo volumen y estos últimos mayores que los que realizaron volúmenes medios.

Tabla 12

Comportamiento tenisiomiográfico del recto femoral y vasto medial agrupadas según el volumen de actividad realizada posterior al maratón.

Músculo	Variable	Bajo (N=4)	Medio (N=5)	Alto (N=8)
		M ± DS	M ± DS	M ± DS
RF	Tc	28.14 ± 3.38	25.94 ± 0.72	29.05 ± 2.28
	Dm	10.54 ± 2.31	9.23 ± 2.66	11.11 ± 2.78
VM	Tc	22.93 ± 2.85	22.05 ± 0.73	23.61 ± 1.35
	Dm	7.86 ± 2.89	7.07 ± 1.84	7.91 ± 1.40

Nota: RF= recto femoral, Dm= desplazamiento radial muscular (mm), Tc= Tiempo de Contracción (ms), VM= vasto medial, M= Media, DS= Desviación Estándar, N= Número.

En la siguiente figura se ilustra cómo los participantes que realizaron un nivel medio de ejercicio físico tienen tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular menores no significativamente que los participantes que realizaron actividades

de nivel bajo y alto entre las mediciones 24 hrs posteriores y 144 horas posteriores al evento.

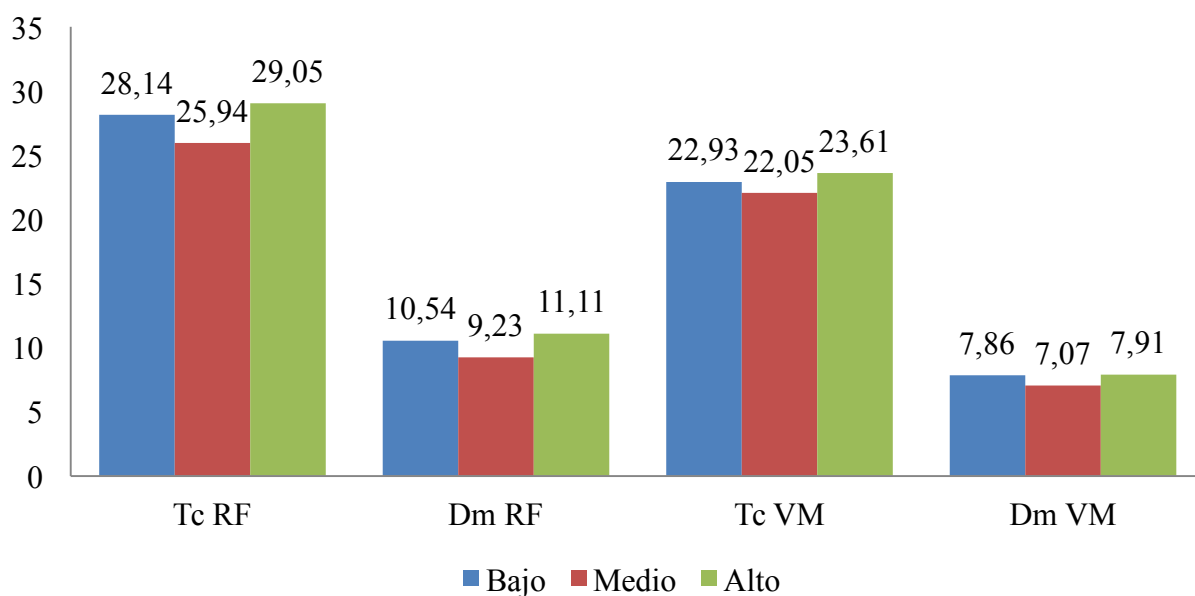


Figura 7. Comportamiento del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular del recto femoral y vasto medial de acuerdo al volumen de actividad física (min) posterior al maratón.

## Capítulo V

### DISCUSIÓN

El presente estudio pretende describir por primera vez, los efectos neuromusculares que conlleva correr un maratón en condiciones de calor y humedad extremos en participantes aficionados desde un abordaje tenisiomiográfico y la posible relación que exista entre estos datos y las características de los participantes.

Con base en la caracterización de los participantes se identifica que los datos demográficos son similares a estudios previos realizados en maratonistas aficionados. En el caso de la edad del presente estudio la cual presenta una media de  $35.82 \pm 7.03$  años, otros estudios reportan edades similares, por ejemplo Nieman y Lee (1990) en la maratón de Los Ángeles registraron edades de  $36.9 \pm 0.2$  años en hombres y  $34.9 \pm 0.1$  años para mujeres. En un muestreo realizado por Ruiz-Juan y Zarauz (2014), en las maratones de Barcelona, Sevilla y San Sebastián, se encontraron edades medias de hombres de  $39.92 \pm 8.91$  años y en mujeres de  $38.10 \pm 8.02$  años. En un estudio realizado por Chang, Shih y Chen (2012), reportan una edad promedio de corredores recreativos participantes en la maratón de Taipei de  $38.8 \pm 11.6$  años. Quinn y Manley (2012), reportan una edad media de  $35.2 \pm 11.1$  años.

En lo que se refiere al peso corporal presentado en este estudio con una media de  $65.24 \pm 12.21$  kg, similar a lo reportado por Quinn y Manley (2012), con un peso medio de los participantes masculinos de  $73.6 \pm 11.9$  kg, similar a lo reportado en la presente investigación en la cual los hombres tienen un media de  $72.74 \pm 10.23$  kg. También Maciejczyk et al. (2015), reportan pesos medios de  $73.0 \pm 2.36$  kg. En lo que se refiere al porcentaje de grasa los participantes del presente estudio tienen una media de  $20.81 \pm 7.68$  %, siendo similares a los datos obtenidos por el autor anterior el cual reporta una media de  $23.1 \pm 1.95$ %.

En cuanto a la talla de los atletas del presente estudio en la cual se obtiene una media de  $168.44 \pm 10.59$  cm, difiere del estudio de Eijsvogels et al (2015) quienes reportan estaturas medias de  $179 \pm 0.1$  cm, posiblemente debido a rasgos característicos de las poblaciones ya que la muestra de este estudio es centroamericana y la referencia holandesa. Otro estudio estadounidense reporta estaturas medias de  $171.2 \pm 14.5$  cms (Quinn y Manley, 2012), lo que resulta similar a la muestra en estudio.

En lo que se refiere al consumo de oxígeno máximo reportado en el presente estudio con una media de  $52.88 \pm 7.09$  ml/kg/min, se encontró en la literatura científica datos similares, por ejemplo Maciejczyk et al. (2015) reporta consumos de oxígeno máximo medio de  $52.4 \pm 5.59$  ml/kg/min. Pfitzinger y Douglas (2012), indica que un maratonista de un ritmo medio debería tener un consumo de oxígeno máximo de 55 ml/kg/min, dato similar al presente estudio y al de Maciejczyk et al. (2015).

Con base en los datos anteriores se aprecia que los sujetos del presente estudio muestran características propias de un corredor aficionado de maratón común. Y que sus características similares a otros estudios permiten con mayor propiedad comparar los resultados entre estudios.

En cuanto al tiempo de finalización de la prueba y la velocidad promedio, con una media de  $225 \pm 37.61$  min y  $2.87 \pm 0.42$  m/s respectivamente para el presente estudio, Nieman y Lee (1990) reportan un tiempo total de carrera en la maratón de Los Ángeles en hombres de  $255.5 \pm 1.1$  y en mujeres  $263.1 \pm 0.6$  min, siendo mayor al compararse al estudio de la maratón de Tamarindo,  $219 \pm 3.7.97$  en hombres y  $233.57 \pm 38.27$  en mujeres. En un muestreo posterior a la maratón de Eindhoven, realizado por Eijsvogels et al. (2015), se registró un tiempo de finalización media de la prueba de  $227 \pm 28$  min y una velocidad media de 3.14 m/s, ambos valores de referencia se asemejan a lo reportado en la maratón en estudio. En lo que se refiere al coeficiente de variación de la velocidad del presente estudio, el cual fue de una media de 11.67%, es menor a estudios previos realizados por Haney (2010), quién reporta variaciones medias de  $16.6 \pm 6.3\%$  y  $16.7 \pm 6.5\%$  en dos maratones de San Diego en años consecutivos. Este mismo autor señala que las variaciones más frecuentes durante un maratón se encuentran entre 12-15%. Lo anterior indica que existe una diferencia aproximada de 3 minutos entre sus 5 kms más rápidos comparados con los más lentos, similar a lo reportado por este estudio.

Ely et al. (2008), señalan que existe un comportamiento común en la media de corredores de un maratón en cuanto a la velocidad de carrera, estos autores indican que los primeros cinco kilómetros son los más rápidos, posteriormente se presenta una disminución de carrera que se mantiene desde los 10 a los 25 kilómetros y posterior a este punto, se presenta una lenta desaceleración hasta los 40 kilómetros, los finales 2.195 kilómetros normalmente se acelera por cercanía con la meta y comúnmente no se incluyen dentro del análisis de la maratón ya que tienen características especiales en velocidad, por lo que en este estudio se excluyen estos 2195 metros. El comportamiento anterior se evidencia en el presente estudio, ya que existe una diferencia significativa ( $t= 5.088$ ,  $p= 0.000$ ) entre la velocidad de los participantes de la primera mitad de la carrera ( $M= 3.17 \pm 0.37$  m/s) contra la segunda mitad ( $M= 2.72 \pm 0.49$  m/s) y el mismo comportamiento se da en el Coeficiente de Variación de Velocidad, en los primeros 20 kilómetros fue de  $3.46 \pm 1.02\%$  y existieron diferencias significativas ( $t= -3.58$ ,  $p= 0.003$ ) con los segundos 20 kilómetros que fue de  $4.16 \pm 1.55\%$ , lo que indica que existe una disminución del ritmo de carrera en la segunda parte del evento y una mayor variación de la velocidad en la segunda parte de la competencia comparada con la primera, significando una menor constancia en el ritmo de carrera.

Añadido a lo anterior los resultados señalan que existe una correlación significativa ( $r= 0.578$ ,  $p= 0.015$ ), entre el coeficiente de variación de la velocidad y el tiempo de carrera en 40 kilómetros, lo que indica que aquellos que presentaron mayores variaciones en el ritmo de carrera tuvieron mayores tiempos de finalización de competencia. Haney (2010), indagaron en dos maratones de San Diego y encontraron datos similares, aquellas personas que llegaron primero, ósea los más rápidos, suelen tener variaciones del ritmo de carrera de aproximadamente 20 segundos en lapsos de 5 kilómetros, por otro lado los menos rápidos, tienen variaciones de hasta 3 min entre el kilómetro más lento y el más rápido, similar al comportamiento de los participantes del presente estudio.

El comportamiento de la velocidad en este estudio y según lo reportado diversos autores (Ely et al.,2008; Haney, 2010), se indica que esta disminución de la carrera es común en competencias de resistencia como el maratón, en el presente estudio pudo haber influencia del ambiente, ya que aproximadamente 2 horas posteriores al inicio del

evento momento que para la mayoría de corredores significaba la mitad de la competencia, el índice de estrés termal sobrepasaba los límites sugeridos por Sport Medicine Australia (2008) ( $\geq 26^{\circ}\text{C}$  y 60% Humedad Relativa) y por American College of Sport Medicine (2007) ( $\text{TGBH} \geq 28^{\circ}$ ) para realizar ejercicio de manera segura, por lo que este factor pudo influir en la disminución del ritmo y el aumento en la variación de la velocidad en la segunda parte del evento.

Una de las variables, según Ely et al. (2008) que influye en la disminución del ritmo de carrera es la temperatura ambiental, aquellos participantes del presente estudio que tenían ritmos de carrera más lentos también pudieron ser influenciados por índices de estrés termal más elevados que aquellas personas que llegaron primero, desde un punto de vista de mayor exposición al calor, lo anterior pudo haber sido un factor agravante de la variabilidad del ritmo de carrera, por ejemplo al llegar el primer participante del presente estudio a meta el TGBH fue de aproximadamente  $26.3^{\circ}$  y el TGBH al momento que la última participante arribó a meta fue de  $30^{\circ}$  aproximadamente.

Con base en los resultados climáticos y en variables como la media de la velocidad de carrera y coeficiente de variación de la velocidad, se puede concluir que las condiciones extremas de calor y humedad podrían haber provocado disminuciones de ritmo de carrera. Estos cambios del ritmo se vieron más marcados en la segunda mitad de la competencia con base en los resultados.

Existe también una correlación significativa entre el tiempo final de carrera y el consumo de oxígeno máximo ( $r = -0.593$ ,  $p = 0.012$ ) que sugiere que entre mayor sea el consumo de oxígeno máximo, menor es el tiempo de finalización de la misma. Tal y como lo indica Lundstrom (2015), este es un comportamiento normal y esperable ya que el consumo de oxígeno máximo, es considerado una variable predictiva del rendimiento físico, entre mayor valor en esta variable mejor rendimiento y menor tiempo de finalización tendría. Claro está que el tiempo final de carrera depende de múltiples factores y que el consumo de oxígeno no es un determinante absoluto ni de rendimiento ni de recuperación.

También existe una correlación significativa entre la velocidad media de carrera y cantidad de impactos en zona 6-6.9g y 7-10g, la cual indica que a mayor velocidad media de carrera mayor cantidad de impactos o fuerzas gravitacionales tienen los

participantes en estas zonas ( $r= 0.668$ ,  $p= 0.003$  y  $r= 0.644$ ,  $p= 0.005$  respectivamente). Los impactos son definidos como la fuerza a la que es expuesto un cuerpo al acelerarse, la misma es ejercida por la gravedad. Lo anterior indica que entre más rápido se traslade el corredor, mayor magnitud de fuerza gravitacional sufre el cuerpo. Clemente (2011), recalca que la cantidad de impactos al realizar zancadas en terrenos como el asfalto puede causar rotura de fibras y describe que correr en terrenos de este tipo produce mayores niveles de CPK que en maratones de montaña por ejemplo, dónde el terreno suele amortiguar más. Carling, et al. (2008), señalan que los impactos de 6-10g son descritos en otros deportes como el rugby como impactos moderados, fuertes y muy fuertes, por lo que podemos realizar una transferencia de la posible magnitud de impactos a lo que se ven expuestos corredores entrenados de maratón, siendo 8.5g el dato de mayor magnitud reportado en el presente estudio.

La diferencia entre los deportes son muchas, desde el tiempo de duración de la competencia hasta la dinámica de velocidades de cada una, esto hace incomparable la cantidad y magnitud de los impactos recibidos en un maratón con otros deportes de conjunto de base anaeróbica como lo es el rugby y el fútbol. Lo anterior no limita la utilización de acelerómetros en el deporte del maratón para cuantificar la carga por medio de impactos (Castellano y Casamichana, 2014; Casamichana, Castellano, Calleja-González y San Román, 2011). A falta de datos para comparar la magnitud de los impactos recibidos en un maratón, se puede contextualizar a otras situaciones para su mayor entendimiento. Por ejemplo, un estornudo puede causar 3g, una montaña rusa hasta 4g, una palmada en la espalda 4.1g, un carro de fórmula uno 5g, un avión de combate aéreo 9-12g, la gravedad al nivel del mar es 1g (Norton, 2010). Estas gravedades, en algunos casos son súbitas y no duran más que milésimas de segundos y otras se mantienen por segundos o hasta más tiempo, lo que podría determinar el efecto que tendrían sobre el cuerpo al considerar intensidad o magnitud con el tiempo que el cuerpo sufre de la misma.

En maratón, el constante choque-amortiguación del cuerpo con el suelo al dar cada zancada, descrito también como aceleración-desaceleración o fuerza excéntrica, aplicando segunda ley de Newton, incrementan la fuerza de la gravedad en reposo sobre el cuerpo ya que este ejerce una mayor fuerza contra el suelo por la caída, toda la fuerza

que retorna al cuerpo con la misma magnitud de la caída es absorbida por las articulaciones, huesos y sobre todo los músculos y este constante impacto podría ser el causante de la fatiga neuromuscular. Hay que considerar también que existen factores que podrían modificar la magnitud del impacto, como una mala técnica de carrera o la velocidad tal y como se describe en este estudio y otros estudios mencionados previamente.

Aunado a lo anterior este estudio demostró que existe una correlación entre la velocidad y la magnitud del impacto, entre más rápido corra el participante, mayor cantidad de impacto en zonas elevadas sufrirá. Entre los participantes, el impacto de mayor magnitud fue de 8.5g, pero estos impactos en zonas altas tienen menor cantidad de registros que los de las zonas más bajas, por ejemplo entre las zonas de 5-10g se registraron una media de 11731 en contraste con las zonas entre 2-4.9g se en las cuales se registraron 62044 impactos. Ahora bien, habría que profundizar en las diferencias y el grado de influencia sobre la fatiga física que el cuerpo humano sufre al recibir impactos altos en volumen pero bajos en intensidad o viceversa, considerando la característica lesiva de los impactos altos como se describe en Carling, Reilly y Williams (2008), para deportes como el fútbol o rugby y la información mostrada en el presente estudio.

Cabe rescatar la influencia que tiene la velocidad sobre la magnitud de la fuerza gravitacional. Por ejemplo en el presente estudio existieron diferencias significativas ( $t = -2.135$ ,  $p = 0.05$ ) entre la cantidad de impactos en zona 3-3.9g entre hombres y mujeres. Aunque sin diferencias significativas, los hombres tuvieron mayor velocidad promedio de carrera que las mujeres ( $M = 3.04$  m/s,  $M = 2.65$  m/s respectivamente) y los hombres ( $M = 13524.2$ ) mayor cantidad de impactos en zonas altas (5-10g) que las mujeres ( $M = 9172.72$ ), por otro lado las mujeres ( $M = 67911.28$ ) mayor cantidad en zonas bajas que los hombres ( $M = 57494.6$ ).

Puede a su vez explicarse desde un punto de vista de la cantidad de masa movilizada por lo hombres y las mujeres. Existieron diferencias significativas entre la cantidad de masa magra y el peso entre ambos grupos, esto podría explicar de la mano con la velocidad, por qué los hombres tuvieron mayores valores en zonas de impacto altas en magnitud sin tener diferencias significativas en la cantidad de impactos totales como se muestra en el párrafo anterior.

Adicionalmente, en mujeres, existió una relación significativa ( $r= 0.907$ ,  $p= 0.005$ ) entre la cantidad de CPK 24 horas posteriores con la cantidad de impactos en las zonas 4-4.9g. Una relación significativa ( $r= 0.853$ ,  $p= 0.015$ ) entre la velocidad de carrera y la cantidad de CPK a 24 horas posteriores y una relación significativa ( $r= 0.867$ ,  $p= 0.012$ ) entre la velocidad de carrera y el  $\% \Delta$  de CPK entre la línea base y 24 horas posteriores al evento. Ya es conocido cómo la CPK es un medio para cuantificar el daño muscular, los hallazgos anteriores ratifican que a mayor velocidad de carrera, el daño muscular es mayor y en mujeres se correlaciona con la cantidad de impactos entre 4-4.9g. En hombres, existe una correlación positiva entre la velocidad promedio y la cantidad de impactos en zonas 6-6.9g ( $r= 0.695$ ,  $p= 0.026$ ) y así como en zonas 7-10g ( $r= 0.642$ ,  $p= 0.045$ ). Lo que deja a análisis cómo los hombres tienen impactos de mayor magnitud por una velocidad de carrera mayor debido a la correlación significativa mostrada en el paratado de resultados comparado con las mujeres y esto relacionado a la correlación positiva que indica que a mayor magnitud del impacto mayor daño. La información anterior podría indicar que un posible predictor del daño es la cantidad de impacto en zonas de mayor magnitud y no así la cantidad de impactos totales.

Adicionalmente existen diferencias significativas ( $t= 2.609$ ,  $p= 0.020$ ) entre hombres y mujeres en las variables de CPK 96 horas previo (hombres=  $237.952 \pm 137.71$  UI/L y mujeres=  $98.90 \pm 28.16$  UI/L) y existen diferencias en el  $\% \Delta$  del CPK ( $t= -2.383$ ,  $p= 0.031$ ) (hombres=  $78.77 \pm 10.47\%$  y mujeres=  $89.25 \pm 5.87\%$ ). No existen diferencias entre los valores 24 horas posteriores al evento. Lo que indica que las mujeres a pesar de que tuvieron menores niveles de CPK basales y mayor cantidad de impactos en zonas bajas de magnitud del impacto, tuvieron porcentajes de cambio de CPK mayores que los hombres. Por lo que se puede concluir que las mujeres del estudio tuvieron mayores modificaciones en el valor de CPK que los hombres, aunque los hombres tengan valores más altos.

Apple y Rhodes (1988) y Rogers, Stull y Apple (1985), reportan que los hombres tienen mayores niveles de CPK posterior a un maratón en diferentes momentos de medición comparado con las mujeres, debido a las diferencias significativas en cantidad de masa entre ambos grupos según los autores, lo cual es similar al comportamiento de los participantes del presente estudio ya que los hombres tuvieron niveles

significativamente mayores de CPK previos ( $237.95 \pm 137.71$  UI/L en hombres y  $98.90 \pm 28.17$  UI/L en mujeres) y niveles no significativamente diferentes posteriores ( $1279.27 \pm 788.31$  UI/L en hombres y  $1124.35 \pm 645.14$  UI/L en mujeres) comparado con las mujeres. Debido a estas diferencias ya descritas ampliamente por la literatura es que no se pueden comparar ambos sexos, por lo que el uso del porcentaje de cambio nos brinda un parámetro más objetivo del comportamiento del daño al visualizar a hombres y mujeres en conjunto.

Es relevante destacar que los niveles de CPK previos al evento de los participantes del presente estudio, son similares a los reportados por otros estudios de competencias similares, por ejemplo Siegel et al. (1980) ha reportado niveles basales de 161 UI/L y Clemente (2011), reporta niveles de 123 UI/L. Al analizar los niveles posteriores se encuentran ciertas variaciones al comparar este estudio con otros realizados, debido las diferencias en ritmo de carrera, condiciones climáticas, momento de medición entre otros, a pesar de ello los datos de los participantes de este estudio se asemejan a los reportados por Sánchez-González et al (2003) ( $465 \pm 254.14$  U/l) quienes evaluaron inmediatamente posterior a realizar un maratón. También existen estudios que obtienen modificaciones mayores como Kratz et al. (2002), Smith et al. (2004) y Siegel et al. (1980, 2007) ( $843.8 \pm 782.3$  UI/l,  $707.8 \pm 376.7$  UI/l, 3424 UI/l y  $745 \pm 97$  UI/l respectivamente).

Siegel et al. (1980), reportan una diferencia previa y posterior de 160-1500 U/l en corredores competitivos (tiempos inferiores las 3 horas 30 minutos) y con niveles 24 horas posteriores a la actividad mayores a 4500 U/l, lo anterior hace suponer la inminente rotura celular debido al trabajo muscular intenso y pequeñas microlesiones que conlleva la exposición del cuerpo humano a este tipo de eventos de alto volumen. Estos últimos datos son los que asemejan a nuestro estudio, en el cual existieron diferencias previas y posteriores de CPK desde 371 UI/L hasta 2446 UI/L al comparar los datos previos y posteriores al evento. Brancaccio et al. (2007), indican que los niveles séricos de CPK aumentan a un nivel máximo a las 24 horas posteriores a la actividad, para luego descender paulatinamente con el descanso y la recuperación por ello se realizó la medición en este punto para el análisis de sangre de los participantes del este estudio.

Múltiples formas de medir la fatiga neuromuscular posterior a eventos de resistencia han existido a través de la historia, desde la medición de los niveles sanguíneos de CPK, pruebas de fuerza y potencia y el comportamiento del cuerpo en valores electromiográficos y biopsias. Hoy en día existe un método que toma fuerza entre la comunidad científica llamado tensiomiografía que brinda valores funcionales del músculo a evaluar.

Los datos de tensiomiografía obtenidos de la presente investigación son similares a los expuestos en estudios anteriores. A pesar de que no existe una base amplia de información tensiomigráfica en maratón o deportes de resistencia y mucho menos del efecto que un evento de este tipo puede generar en la recuperación, se tiene referencia de otros deportes.

Deportes de intensidad intermitente como el fútbol reportan valores medios de tiempo de contracción muscular de aproximadamente 26-30 ms para el RF y una media del desplazamiento radial muscular de 8-12 mm (Alentorn-Geli et al., 2014; Álvarez-Díaz et al., 2014a; Álvarez-Díaz et al., 2014b; Gutiérrez-Vargas et al., 2016; Rey, Lago-Peñas, Lago-Ballesteros y Casais, 2012; Rey, Lago-Peñas y Lago-Ballesteros, 2012; Rusu et al., 2013). En deportes de resistencia el tiempo de contracción muscular aumenta a más de 35 ms y el valor de desplazamiento radial muscular es de aproximadamente 7-9 mm (García-García, 2013; García-García, Hernández-Mendo, Serrano-Gómez y Morales-Sánchez, 2013).

Con respecto a deportes de resistencia como el triatlón, García-Manso et al. (2011), reportan valores en reposo de 30 ms en tiempo de contracción muscular y 8 mm en desplazamiento radial muscular para el músculo recto femoral en la población mencionada, lo que indicaría mayor prevalencia de fibras de contracción lenta y con alta resistencia a la fatiga (Dahmane et al., 2001). Los datos anteriores son menores a los reportados por García-García (2013) en ciclistas profesionales en pretemporada (tiempo de contracción muscular =  $45,9 \pm 16,2$  ms, desplazamiento radial muscular =  $7,4 \pm 2,8$ mm) y se asemejan a lo reportado por García-García, Hernández-Mendo, Serrano-Gómez y Morales-Sánchez (2013), quienes diferencian los datos obtenidos durante una pretemporada y durante el periodo competitivo en ciclistas profesionales (tiempo de contracción muscular =  $35,9 \pm 5,5$  ms [precompetitivo] y  $45,9 \pm 16,2$  ms [competitivo],

desplazamiento radial muscular =  $8,6 \pm 3,0$  mm [precompetitivo] y  $7,4 \pm 2,8$  mm [competitivo]), los mismos sobrepasan el límite de 30 ms en el tiempo de contracción muscular reportado por García-Manso et al. (2011) y Dahmane et al. (2001), como deportes de base aeróbica.

El único antecedente en maratón ha sido realizado por Loturco et al. (2015), con valores de maratonistas y triatletas profesionales, los autores reportan un tiempo de contracción muscular y un desplazamiento radial muscular de Bíceps Femoral de  $19.4 \pm 3.3$  y  $4.23 \pm 1.75$  respectivamente y un tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular de recto femoral de  $22.9 \pm 4$  y  $8.88 \pm 3.45$  respectivamente. Los valores anteriores son menores a los reportados por el presente estudio, pero hay que recalcar que los participantes del estudio de Loturco et al. (2015), debido a su condición de profesionales, tienen características antropométricas, funcionales y de desempeño físico diferente a los aficionados de este estudio, por lo que habría que ahondar en las diferencias entre estas poblaciones a nivel tensiomiográfico.

En cuanto a las correlaciones de diversas variables que puedan existir con los resultados de tensiomiografía, se demostró que existe una correlación positiva entre el rango de impactos de magnitud 3-3.9g con mayores niveles de Tiempo de Contracción y desplazamiento radial muscular del recto femoral y vasto medial. Añadido a lo anterior se muestra que a mayor cantidad de impactos en los rangos de magnitud 6-6.9g y 7-10g existen mayores Desplazamientos Radiales Musculares del recto femoral (ver tabla 3). Esto nos arroja la posibilidad de relacionar determinadas fuerzas g con el comportamiento del músculo a las 24 horas posteriores al evento.

En las mujeres existe una correlación negativa y significativa entre la cantidad de impactos en zona 3-3.9g y la media del desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento, así como una correlación positiva significativa entre el desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento y la cantidad de impacto en zona 4-4.9g, esta última zona fue la que presentó correlación con altos niveles de CPK 24 horas posteriores al evento, lo que podría sugerir que altos valores en el desplazamiento radial muscular del recto femoral pueden ser indicativos de fatiga neuromuscular al igual que el indicador bioquímico antes mencionado. En los hombres existe una correlación positiva significativa entre la cantidad de impactos en

zona 7-10g con la media del desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento. Lo anterior indica que no solo el volumen de impactos sino su intensidad son determinantes de daño medido por tenisiomografía y CPK.

Añadido a lo anterior, existieron también correlaciones significativas entre el  $\% \Delta$  de CPK cuantificado 96 horas previas y 24 horas posteriores con el  $\% \Delta$  de los valores de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular en recto femoral entre la Línea Base y 24 hrs post. Esto indica que a medida que aumenta el CPK también lo hacen los valores de tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular en el recto femoral 24 horas posteriores con respecto a la Línea Base. En hombres existe una correlación entre el porcentaje de cambio del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular con el  $\% \Delta$  del CPK. Lo anterior también sugiere que el comportamiento en aumento del Tiempo de Contracción y desplazamiento radial muscular se podría traducir a estados de fatiga neuromuscular y daño muscular.

Al comparar el  $\% \Delta$  del hemisferio dominante y el hemisferio no dominante entre la evaluación la LB y 24 posteriores con el  $\% \Delta$  CPK, se encuentra una correlación positiva significativa para el desplazamiento radial muscular del hemisferio dominante y una correlación positiva significativa entre el  $\% \Delta$  del CPK y el  $\% \Delta$  del tiempo de contracción muscular del hemisferio dominante de la evaluación base a 24 horas posterior a la carrera, el comportamiento del Hemisferio No dominante no tiene relación significativa con el  $\% \Delta$  del CPK. Lo anterior sugiere diferencias en el comportamiento de los dos hemisferios del miembro inferior.

Se conoce la existencia de desbalances musculares entre hemicuerpos de la extremidad inferior, esto se ha realizado para muchos fines, entre ellos, identificar asimetrías y prevenir lesiones músculo esqueléticas (Soderman, Alfredson, Pietila y Werner, 2001; Newton, et al, 2006). Con base en esta evidencia científica al respecto se ha demostrado claramente que un desequilibrio de fuerza entre los músculos extensores de la rodilla y los flexores de la rodilla, puede ser una de las causas de los trastornos músculo-esqueléticos más comunes (Soderman, Alfredson, Pietila y Werner, 2001; Newton, et al, 2006). Se han reportado diferencias laterales en la fuerza y parámetros neuromusculares relacionados con la dominancia de tren inferior (Blache y Monteil, 2012; Ergun, Islegen y Taskiran, 2004). En el caso del presente estudio, se identificaron

variaciones en la rigidez muscular del hemisferio dominante y hemisferio no dominante expresada por el desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral 24 horas posteriores al evento, siendo el desplazamiento radial muscular del hemisferio no dominante significativamente mayor al hemisferio dominante. El mismo comportamiento se presenta en hombres al comparar hemisferio dominante y hemisferio no dominante del desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral 24 posterior al evento, en el caso de las mujeres las diferencias se encuentran 144 horas posteriores al evento en el desplazamiento radial muscular del músculo recto femoral. Esto indica que el correr un maratón acentúa de manera significativa las diferencias existentes entre ambos segmentos 24 horas posteriores a la competición, lo que agudiza las posibles consecuencias adversas a la salud que podría sufrir el participante posterior al evento.

Con base en la información anterior recabada en el presente estudio y según la literatura científica se podría señalar que el hemisferio dominante tiene cambios más marcados que el Hemisferio No dominante en este tipo de eventos. Autores mencionan que existen factores ambientales como las irregularidades del terreno, inclinación de la zona de carrera que requieren movimientos compensatorios, afectan la mecánica de movimiento de articulaciones lo que podría tener una influencia importante en los desbalances en aspectos biomecánicos entre los hemicuerpos del tren inferior (Carpes, Mota y Faria, 2010). Seeley, Umberger, Clasey y Shapiro (2010), indican que los desbalances más comunes se presentan en las articulaciones de tobillo y rodilla.

Carpes, Mota y Faria (2009), menciona que las irregularidades en el terreno causan compensaciones naturales en la mecánica del cuerpo lo que puede modificar la carga en músculos, articulaciones y huesos de los miembros no dominante y dominante. Los autores anteriores rescatan que la velocidad modifica las asimetrías, siendo más simétrica la carrera a mayor velocidad. Lo anterior puede explicar por qué el miembro dominante de los participantes del presente estudio tiene mayores modificaciones en el Desplazamiento Muscular, lo cual está relacionado con la fatiga como se describió anteriormente.

García-Manso et al. (2011), indica mediante datos tensiomiográficos que existe en la técnica de carrera una predisposición a sobrecargar un miembro inferior sobre otro, destaca que el miembro dominante suele exponerse a mayor estrés que el no dominante,

tal y como se manifiesta en el presente artículo, lo cual puede conllevar un mayor riesgo de lesión, similar a lo expresado por otros autores en estudios sin uso de la TMG, en los cuales la dominancia hemilateral tiene una relevancia epidemiológica de lesión (Bennel et al., 1998; Blache y Monteil, 2012; Croisier et al., 2002; Ergun, Islegen y Taskiran, 2004; Faude et al., 2006).

En el caso del maratón, esta asimetría aumentada podría provocar una predisposición a sufrir una lesión si el participante se expone a cargas de entrenamiento altas en volumen e intensidad sin tener una recuperación adecuada del organismo, por lo que es importante considerar los tiempos de recuperación entre eventos y competiciones.

Estudios previos reportan un comportamiento del cual se puede analizar que el valor de desplazamiento radial muscular en el hemisferio no dominante es en la mayoría de los casos mayor que el del hemisferio dominante, expresando una menor rigidez muscular, así como los valores de tiempo de contracción muscular ligeramente menores en el hemisferio dominante (Kokkonen, Nelson y Cornwell, 1998; Krizaj et al., 2008; Rey, Lago-Peñas y Ballesteros, 2012; Valencic y Knez, 1997).

Adicionalmente, al comparar las medias del Tiempo de Contracción y el desplazamiento radial muscular del recto femoral y el vasto medial en los 3 momentos de medición, solamente se encontraron diferencias significativas en el desplazamiento radial muscular del recto femoral entre la línea base y la evaluación 144 horas posteriores al evento. Lo anterior a pesar de que existe una tendencia del desplazamiento radial muscular del recto femoral y vasto medial a aumentar desde la línea base hasta 144 horas posteriores.

Por otro lado el Tiempo de Contracción tiende a aumentar en ambos músculos a las 24 horas y a recuperarse a las 144 horas. Lo que indica que desde un punto de vista de unión neuromuscular el recto femoral y el vasto medial se podrían estar recuperando pasadas 144 horas, no se presenta la misma tendencia para el desplazamiento radial muscular, proceso en el cual intervienen factores intramusculares y mecánicos a diferencia de la variable de Tiempo de Contracción.

Los dos parámetros tensiomiográficos utilizados en el presente estudio, son determinantes de fatiga, el desplazamiento radial muscular, es el desplazamiento radial del vientre muscular expresado en milímetros. Lo que según los autores representa y

evalúa la rigidez muscular (Valencic et al., 2000; Dahmane et al., 2005; Krizaj et al., 2008). El comportamiento puede ser hacia el aumento o hacia el descenso de sus valores, donde valores bajos sugieren un aumento de la rigidez muscular y valores elevados indican falta de tono muscular, disminución en la rigidez o fatiga (Rodríguez-Matoso, 2013).

El tiempo de contracción muscular, es el tiempo que transcurre desde que finaliza el Tiempo de Reacción (10% de desplazamiento radial muscular) hasta que alcanza el 90% de la deformación radial muscular máxima (García-Manso et al., 2010). Un incremento en la velocidad de contracción puede indicar una pérdida de la fuerza muscular o fatiga (Rusu et al., 2013).

Basado en lo anterior, la tendencia al aumento gradual del desplazamiento radial muscular del recto femoral en el presente estudio sugiere daño muscular, fatiga y sus secuelas 24 horas posteriores al ejercicio y el mismo comportamiento 144 horas posteriores al ejercicio.

Parte importante de este estudio fue indagar sobre el comportamiento de los participantes posterior al maratón por ello se llevó una recolección de la cantidad de tiempo de actividad física entre las evaluaciones 24 horas y 144 horas posteriores, con el fin de explicar comportamientos a corto plazo. Las actividades fueron natación, ciclismo y carrera, para realizar un análisis se dividió el grupo en tertiles. Se encontró una tendencia no significativa que indica que un nivel de actividad medio, colabora a mantener Desplazamientos Radiales Musculares y Tiempos de Contracción del recto femoral más bajos y cercanos al estado previo al maratón, por el contrario, no realizar, realizar poca actividad o realizar mucha actividad, aumentan el Tiempo de Contracción y Desplazamientos Musculares del recto femoral.

Los sujetos realizaron diferentes tipos y volúmenes de ejercicio, por ello no se podría indicar con certeza que tenga relación con la fatiga de manera certera, aunque el comportamiento sea un aumento del desplazamiento radial muscular y del tiempo de contracción muscular del recto femoral.

Estos comportamientos se han presentado en un antecedente descrito por García-Manso et al (2011), quienes reportaron un aumento del desplazamiento radial muscular del recto femoral inmediatamente posterior a un evento de ultratriatlón. Este estudio de

García-Manso et al. (2011) no mencionan qué sucede con el músculo 24 horas posteriores al evento, lo que si se realiza por primera vez en este estudio. El Tiempo de Contracción del recto femoral en esta investigación pareciera que recobra los valores base a las 144 horas posteriores al evento en ambos músculos, pero si se ven afectados de manera no significativa 24 horas posteriores al mismo como es común en condiciones de fatiga según las referencias consultadas. El comportamiento del desplazamiento radial muscular del recto femoral 144 horas posteriores al evento, es diferente entre los grupos según cantidad de minutos realizados en este lapso, lo cual indica que la realización de actividad física categorizada como moderada en volumen logra estabilizar los valores de desplazamiento radial muscular según parámetros tensiográficos (García-Manso et al., 2012), no así los que realizaron alto o bajos volúmenes de entrenamiento.

García-Manso et al. (2012), reportan el comportamiento del bíceps braquial durante el ejercicio de alto volumen y alta carga, el mismo muestra un aumento gradual del tono muscular durante e inmediatamente posterior al ejercicio, sin embargo, se genera una disminución gradual (aumento del desplazamiento radial muscular), hasta 15 minutos después de detener la actividad física, los estudios existentes en este campo no reportan lo que sucede 24 horas posterior al ejercicio físico, pero los datos del presente estudio pareciera que el comportamiento se mantiene 24 horas posteriores a la actividad y con la actividad registrada durante las 144 horas posteriores, el comportamiento sigue siendo similar.

El aumento del desplazamiento radial muscular y el tiempo de contracción muscular del recto femoral, como indicadores de fatiga se pueden explicar desde el estudio de la fatiga periférica. La misma puede ocurrir en alteraciones de la conexión neuromuscular, fallas en la transmisión nerviosa, depleción de neurotransmisores, dificultades en los receptores en la placa motora, alteraciones en la excitación del sarcolema y túbulos T o una incapacidad del retículo sarcoplasmático de liberar calcio suficiente o también puede ser una modificación bioquímica o metabólica (Plowman y Smith, 2014).

Desde un punto de vista bioquímico la fatiga puede explicarse desde dos aristas, la ausencia o la acumulación. La ausencia es la depleción de sustancias o fuentes energéticas como calcio, potasio, glucógeno y fosfocreatina. La acumulación se explica por metabolitos que no permiten la contracción muscular como el lactato, iones de

hidrógeno, fosfato, la depleción de electrolitos o deshidratación intracelular, entre otros. Debe verse como un resultado de ambos procesos, si consideramos que durante el ejercicio se presentan ambos (Plowman y Smith, 2014; Powers y Howley, 2012).

Según los autores las causas de la fatiga neuromuscular, basándose en procesos metabólicos y celulares, en ejercicios de intensidad moderada a alta en condiciones submáximas y de larga duración, como lo es un maratón, son la depleción de glucógeno, la acumulación de  $H^+$ , la inhibición de la glucólisis, la disminución de  $Ca^{2+}$  liberado por el retículo sarcoplasmático, interferencias con la captación  $Ca^{2+}$  de por la troponina (Plowman y Smith, 2014). Estos procesos no permitirían que la contracción muscular se realice de forma adecuada por una disfunción de los neurotransmisores y de la sinapsis motora lo que afectaría el tiempo de contracción muscular, estos procesos también afectan el tono y rigidez del músculo, lo que modificaría el comportamiento del desplazamiento radial muscular.

Alonso y Uribe (2001), mencionan que el sobreuso muscular puede resultar en una caída transitoria de los niveles de glucógeno muscular, los cuales según sus estudios son menores 24 horas posteriores a la actividad que aquellos que se evaluaron inmediatamente posterior a la actividad que consistía en ejercicio de componente excéntrico.

Según investigaciones la disminución en la generación de fuerza y de mantener un adecuado tono es producto de la fatiga neuromuscular (Armstrong, 1984; Byrne et al., 2004; Cheung et al., 2003; Smith, 1991), lo que se podría ver reflejado en un aumento del desplazamiento radial muscular. Este proceso natural puede ser indicativo de trauma mecánico, daño muscular e inflamación. Los ejercicios de características excéntricas, esfuerzos intensos y ejercicios a los que el cuerpo no se ha adaptado, provocan en el cuerpo modificaciones importantes, una de ellas es la interrupción de proteínas estructurales en las fibras musculares, especialmente en las líneas Z de los sarcómeros. El daño ocurre en el tejido conectivo de las uniones músculo tendinosas. Lo anterior produce un daño en el sarcolema, provoca una acumulación de  $Ca^{2+}$ , que provoca una inhibición de la producción de ATP. Un aumento en la cantidad de calcio conlleva degradación de las líneas Z lo que altera el cito esqueleto del sarcómero, troponina y tropomiosina que lleva posteriormente a una muerte de tejido. Y por último el daño

estructural produce procesos inflamatorios y activación del sistema inmune, el líquido o fluido se traslada al músculo y causa edema. La acumulación de sub productos y desechos de la muerte celular y la respuesta inmune, además del aumento en la presión provocada por el edema, estimula los receptores de dolor en sus terminaciones nerviosas (Armstrong, 1984; Byrne et al., 2004; Cheung et al., 2003; Plowman y Smith, 2014; Smith, 1991), esto explicaría que el músculo no tiene la capacidad para mantener las microcontracciones necesarias para lograr un adecuado tono a pesar de la rigidez no relacionada a la contracción muscular, lo que provocaría un aumento del desplazamiento radial muscular.

El daño muscular, provoca una disminución en la función, especialmente en ejercicios con componente excéntrico, este daño provoca, pérdida en la fuerza, potencia y desempeño físico. Afecta a su vez, la capacidad de mantener contracciones con patrones anormales de reclutamiento, altera la mecánica articular y el rango de movimiento de las mismas (Plowman y Smith, 2014). Lo anterior provoca que el cuerpo reclute músculos no utilizados con frecuencia para una función en específico como medio compensatorio de la pérdida de función de la musculatura principal (Cheung et al., 2003), lo que explicaría por qué existe un aumento significativo del desplazamiento radial muscular del recto femoral del hemisferio no dominante 144 horas posteriores al evento. El recto femoral por ser un músculo biarticular y estar muy involucrado en la acción biomecánica de carrera, es que presenta diferencias significativas, no así en el vasto medial.

Con base en lo anterior, un aumento del desplazamiento radial muscular posterior a un evento de resistencia, en el cual se sabe de antemano que causa múltiples modificaciones estructurales, expresa la incapacidad del músculo de generar contracciones funcionales, por lo que realiza una contracción poco controlada y débil. La baja capacidad del músculo de realizar puentes cruzados de actina miosina, por las barreras fisiológicas descritas con anterioridad, son la causa de la poca rigidez y tonicidad del músculo recto femoral.

Este estudio ratifica el comportamiento en aumento del tiempo de contracción muscular así como del desplazamiento radial muscular 24 horas posteriores al ejercicio, el cual se mantiene a las 144 horas posteriores al evento de maratón. La recuperación

neuromuscular no se ha obtenido aún 6 días posteriores al evento de resistencia. Millet et al. (2011) indican que los valores de función neuromuscular retornan a sus líneas bases a los 16 días y la mayoría de factores vuelven a su estado inicial 9 días posteriores al evento y que 5 días posteriores no han recuperado su estado basal.

A pesar de ello Noakes citado por Kolata (2012), indica que la recuperación posterior a un maratón depende de múltiples factores. Por ejemplo Coyle citado por el mismo autor señala que la recuperación se da basado en la desaparición del malestar muscular, Noakes menciona que no se puede saber cuándo realmente un corredor se encuentra preparado para realizar un evento similar y que depende de factores psicológicos más que físicos. Urso citado por Kolata (2012), señala que no existe una única forma de medir la fatiga o la recuperación. Noakes, se atreve a dar un dato y menciona que la recuperación psicológica posterior a un maratón se puede dar aproximadamente a los seis meses. Otro punto de vista tiene Urso, quién defiende que cada tres meses se puede estar preparado si se realiza un adecuado incremento de cargas posterior al maratón, indicando que un participante puede volver a su línea base de dos a tres semanas si se tiene un plan acorde.

Es claro que al correr un maratón se producen en el organismo modificaciones fisiológicas y físicas importantes, esto siempre causará un desequilibrio en el cuerpo humano a pesar de estar preparado para hacerle frente a este reto, desde un punto de vista tensiomiográfico y bioquímico existen cambios que sugieren que no existe recuperación total a las 144 horas posteriores al evento. Por lo que hay que recalcar la relevancia de los procesos adecuados de recuperación, el descanso y las prevenciones previas a un evento de esta índole. A lo anterior habría que añadir que existen condiciones adversas como el ambiente y más puntualmente el índice de estrés termal que no solo empeora las condiciones de carrera sino que causa modificaciones en el plan de la misma en los corredores, al disminuir el ritmo de carrera y aumentar la duración de su exposición a ambientes hostiles.

## **Capítulo VI**

### **CONCLUSIONES**

- Los valores del índice de estrés termal durante la competencia sobrepasaron los límites internacionales de seguridad al competir físicamente.
- Los valores obtenidos de peso, talla, porcentaje de grasa,  $VO_{2m\acute{a}x}$ , velocidad promedio y coeficiente de variación de la velocidad de los participantes del presente estudio son similares a investigaciones realizadas a nivel mundial, esto significa que los corredores en esta investigación cuentan con condiciones normales antropométricas.
- Los niveles de CPK previos a la maratón se asemejan a estudios similares en diferentes poblaciones. A lo que se debe añadir que el aumento de CPK posterior a la competencia es considerada como normal para la población y no presenta valores extremos que se puedan relacionar con las condiciones ambientales adversas.
- En cuanto a las variables cinemáticas se presentaron diferencias significativas en el coeficiente de variación de la velocidad y la media de velocidad de carrera entre los primeros 20 kilómetros comparados con los segundos 20 kilómetros. Lo cual indica que a mayor coeficiente de variación de la velocidad mayor tiempo de carrera en 40 kilómetros. Aunado a lo anterior existe una correlación significativa que indica que a mayor  $VO_{2m\acute{a}x}$  menor es el tiempo de carrera en 40 kilómetros. Con base en lo anterior se puede concluir que las personas que tuvieron un ritmo más constante obtuvieron mejores resultados finales en cuanto al tiempo de finalización de carrera.
- En lo referente a los factores que podrían haber colaborado a un estado de fatiga se encuentran los impactos, de los cuales se concluye que existe una correlación positiva significativa que indica que a mayor velocidad media de carrera mayor es la cantidad de impactos entre 6-6.9g y 7-10g. En estos parámetros existen

diferencias significativas entre la cantidad de impactos en zona 3-3.9g según sexo. Lo anterior significa que aquellas personas que corren de manera más intensa son más propensos a recibir mayores cargas y daño muscular.

- Se indagó sobre el efecto que tienen la velocidad y los impactos sobre los niveles de CPK y se concluye que en mujeres, existe una correlación positiva y significativa que indica que a mayor velocidad media de carrera mayores son los niveles de CPK 24 horas posteriores al evento. Lo anterior refuerza la evidencia que a mayor intensidad mayor daño orgánico. En mujeres, a mayor velocidad media de carrera mayor es el porcentaje de cambio de CPK. En hombres, existe una correlación significativa y positiva la cual indica que a mayor velocidad media de carrera mayor es la cantidad de impactos en zonas 6-6.9g y en zonas 7-10g.
- Existen diferencias significativas entre los niveles previos de CPK entre hombres y mujeres, en los cuales los hombres presentan valores mayores. Existen diferencias en el porcentaje de cambio del CPK según sexo, siendo los de las mujeres mayores. La evidencia científica es muy clara al concluir sobre las diferencias por sexo en los valores y modificaciones del CPK.
- En cuanto al efecto que variables cinemáticas tuvieron en el comportamiento tensiomiográfico se concluye que existe una correlación significativa y positiva que indica que a mayor cantidad de impactos en zonas 6-6.9g y 7-10g mayores son los valores de desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento. Sumado a lo anterior se presentó una correlación significativa y positiva la cual indica que a mayor cantidad de impactos en zona 3-3.9g mayor es el desplazamiento radial muscular y Tiempo de Contracción 24 horas posteriores y 144 horas posteriores al evento del recto femoral y el vasto medial. En mujeres, a mayor cantidad de impactos en zonas 3-3.9g menor es el desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento. En mujeres, a mayor cantidad de impactos en zonas 4-4.9g mayor es el desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posteriores al evento. En hombres, a mayor cantidad de impactos en zonas 7-10g mayor es el desplazamiento radial muscular del recto femoral 24 horas posterior al evento.

- Se concluye que existen correlaciones significativas entre la variabilidad del CPK y la variabilidad de los datos tensiomiográficos, por ejemplo se indagó que a mayor porcentaje de cambio del CPK mayor desplazamiento radial muscular y mayor Tiempo de Contracción del recto femoral 24 horas posteriores al evento. Aunado a ello a mayor porcentaje de cambio del tiempo de contracción muscular y desplazamiento radial muscular del recto femoral mayor es el porcentaje de cambio del CPK y a mayor porcentaje de cambio del Tiempo Contracción Muscular y el desplazamiento radial muscular del hemisferio dominante del recto femoral mayor es el porcentaje de cambio del CPK.
- La maratón causó un aumento en las diferencias entre hemicuerpos inferiores. El evento provocó un aumento de las diferencias entre hemisferios en el desplazamiento radial muscular 24 horas posteriores. Esto se expresa como un aumento de la rigidez muscular del hemisferio dominante mayor que el del hemisferio no dominante. Este mismo comportamiento se presenta en hombres, en el caso de las mujeres la diferencia se acentúa 144 horas posteriores al evento.
- En lo referente a las modificaciones de los valores tensiomiográficos a través del tiempo, se concluye que el tiempo de contracción muscular y el desplazamiento radial muscular del recto femoral tienden a aumentar 24 horas posteriores al evento. El tiempo de contracción muscular recobra el estado base 144 horas posteriores y el desplazamiento radial muscular sigue aumentando hasta ser significativamente diferente. Por lo que la rigidez muscular 144 horas posteriores al evento es menor al compararlo con la línea base.
- El efecto de las condiciones ambientales extremas de calor y humedad pareciera no haber afectado en la fatiga de los participantes pero si en la disminución del ritmo de carrera, a ello se le suma la experiencia de los corredores para no sobre exponerse.
- Las modificaciones en la rigidez muscular evaluada por la tensiomiografía se podrían haber dado por la incapacidad funcional del músculo de mantener contracciones constantes para conservar el tono, explicado por la cantidad de sustancias acumuladas y procesos inflamatorios intramusculares.

- El presente estudio brinda evidencia a la comunidad científica sobre el comportamiento de datos tensiomiográficos posteriores a un maratón en condiciones extremas de calor y humedad.

## **Capítulo VII**

### **RECOMENDACIONES**

- Para futuros estudios es necesario contar con mayor cantidad de muestra, lo que significa mayor cantidad de participantes dentro del estudio los resultados tienen más validez y se puede ser más concluyente, así como iniciar con una mayor cantidad de participantes, ya que la mortalidad en este tipo de estudios es alta debido a las características y exigencias del mismo.
- Se recomienda realizar un control del ejercicio físico de los participantes para controlar de esta manera posibles factores que afecten los datos neuromusculares, a pesar de que en este estudio la consigna fue aportar información sobre la situación real y no controlada de un corredor aficionado.
- Sería un buen aporte replicar el estudio con una muestra más homogénea, ya sea seleccionarlos en percentiles de tiempo de llegada, entrenamiento total o sexo. A lo que se puede agregar que se realicen mediciones de tensiomiografía más frecuentemente para observar el comportamiento de los músculos a lo largo del tiempo, esto puede realizarse inmediatamente después del mismo y repetirlo cada 12-24 horas posterior, así como realizar mediciones del Bíceps Femoral como músculo biarticular que se ve involucrado en el ciclo de carrera.
- En cuanto a los impactos y otras variables cinemáticas surgen muchas preguntas generadoras por lo que sería de utilidad, analizar cómo influye la velocidad de carrera en mujeres y hombres en la cantidad de impactos por zona, analizar cuáles impactos y magnitudes son los que provocan mayor daño muscular, analizar el papel que tienen el peso y la velocidad sobre la magnitud de los impactos, realizar un muestreo de cómo influye la técnica de carrera en la magnitud del impacto, indagar sobre cómo influye el cambio de ritmo de carrera en la fatiga y recuperación de los corredores, indagar sobre la diferencia que existe en los impactos de alto volumen o alta intensidad como factores lesivos y

su influencia en la fatiga, indagar sobre cómo influye la velocidad de carrera en la fatiga y recuperación de los corredores, estudiar qué causa más fatiga si un elevado número de impactos en zonas bajas o en zonas altas según la magnitud del mismo.

- Una de las interrogantes es el comportamiento del CPK y de la tensiomiografía posterior a los eventos de resistencia, con base en la experiencia del presente estudio se propone realizar evaluaciones de CPK inmediatamente posterior al evento para determinar el nivel de daño muscular debido al estímulo y realizar evaluaciones de TMG inmediatamente posterior al evento para determinar las modificaciones neuromusculares que podría causar la competencia.

## REFERENCIAS

Abbis, C. y Laursen, P. (2005). Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Medicine*, 35(1): 865-898. DOI: 10.2165/00007256-200535100-00004

- Ahtianen, J. Kraemer, M.J. y Hakkinen. (2002). Changes in muscular architecture after single heavy resistance exercise. International Conference on Strength Training. Budapes, November 2002.
- Alentorn-Geli, E., Álvarez-Díaz, P., Ramon, S., Marin, M., Steinbacher, G., Boffa, J.J., Cuscó, X., Ballester, J. y Cugat, R. (2014). Assessment of neuromuscular risk factors for anterior cruciate ligament injury through tensiomyography in male soccer players. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, mayo. DOI 10.1007/s00167-014-3018-1.
- Alonso, M. y Uribe, I. (2001). DOMS: Dolor muscular de inicio retardado. *Apunts: Educación Física y Deportes*, 136: 5-13. Recuperado desde [http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?f=10&pident\\_articulo=13105802&pident\\_usuario=0&pcontactid=&pident\\_revista=277&ty=20&accion=L&origen=bronco%20&web=www.apunts.org&lan=es&fichero=277v36n136a13105802pdf001.pdf](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?f=10&pident_articulo=13105802&pident_usuario=0&pcontactid=&pident_revista=277&ty=20&accion=L&origen=bronco%20&web=www.apunts.org&lan=es&fichero=277v36n136a13105802pdf001.pdf)
- Álvarez-Díaz, P., Alentorn-Geli, E., Ramon, S., Marin, M., Steinbacher, G., Rius, M., Seijas, R., Ballester, J. y Cugat, R. (2014a). Effects of anterior cruciate ligament reconstruction on neuromuscular tensiomyographic characteristics of the lower extremity in competitive male soccer players. *Knee Surgery Sports Traumatology and Arthroscopy*. doi:10.1007/s00167-014-3165-4.
- Álvarez-Díaz, P., Alentorn-Geli, D., Ramon, s., Marin, M., Steinbacher, G., Rius, M., Sijas, R., Ballester, J. y Cugat, R. (2014b). Comparison of tensiomyographic neuromuscular characteristics between muscles of the dominant and non-dominant lower extremity in male soccer players. *Knee Surgery Sports Traumatology and Arthroscopy*. DOI 10.1007/s00167-014-3298-5.
- American College of Sports Medicine.(2007). Position Statement: Exertional Heat Illness during Training and Competition. *American Sport Medicine Journal, Special Communication*, p. 556-572. Recuperado desde <http://khsaa.org/sportsmedicine/heat/acsmexertionalheatillness.pdf>
- Anderson, T. (1996). Biomechanics and running economy. *Sports Medicine*, 22(2), 76-89. DOI:10.2165/00007256-199622020-00003

- Apple, F.S. y Rhodes, M. (1988). Enzymatic estimation of skeletal muscle damage by analysis of changes in serum creatine kinase (abstract). *Journal of Applied Physiology*, 65 (6): 2598-2600. Recuperado desde <http://jap.physiology.org/cgi/pmidlookup?view=long&pmid=3215860>
- Association of International Marathons and Distance Races (AIMS). (2012). Marathon History [Historia del maratón]. Recuperado desde [http://aimsworldrunning.org/marathon\\_history.htm](http://aimsworldrunning.org/marathon_history.htm)
- Asencao, A., Rebelo, A., Oliveira, E., Marques, F, Pereira, L. y Magalhaes, J. (2008). Biochemical impact of soccer match-analysis of oxidative stress and muscle damage markers throughout recovery. *Clinical Biochemistry*, 41: 841-851. DOI:10.1016/j.clinbiochem.2008.04.008
- Astrand, P., Rodahl, K., Dahl, H. y Stromme, S. (2010). *Manual de fisiología del ejercicio*. Barcelona, España: Editorial Paidotribo.
- Armstrong, L. y Hubbard, R. (1985). High and dry. *Runners World*, J:38-45
- Armstrong, R. B. (1984). Mechanisms of exercise-induced delay onset muscular soreness: a brief review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 16(6): 376-396. <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-198412000-00002>
- Bandeira, F., Muniz, M., Abreu, M., Nohama, P., y Borba, E. (2012). Can Thermography Aid in the diagnosis of the injuries in soccer athletes?. *Revista Brasileira du Medicina du Esporte* , 18 (4), 246-251. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-86922012000400006>
- Basseville, M. y Nikiforov, I. (1993). *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice Hall, United States of America.
- Barbero-Alvarez, J.C., Coutts, A., Granda, J., Barbero-Álvarez, V. & Castagna, C. (2010). The validity and reliability of global positioning satellite system device to assess speed and repeated sprint ability (RSA) in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 232-235.
- Benítez Jiménez, A.; Fernández Roldán, K.; Montero Doblas, J.M. y Romacho Castro, J.A. (2013) Fiabilidad de la tensiomiografía (tmg) como herramienta de valoración muscular. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la*

*Actividad Física y el Deporte*, 13 (52) pp. 647-656. Recuperado desde <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista52/artfiabilidad398.htm>

- Bennel, K. Wajswelner, H, Lew, P., Schall-Riauour, A., Leslie, S., Plant, D. y Cirone, J. (1998). Isokinetic strength testing does not predict hamstring injury in Australian Rules footballers. *British Journal of Sport Medicine*, 32(1), 309-314.
- Billat, V., Slawinski, J., Danel, M., y Koralsztein, J. (2001). Effect of free versus constant pace on performance and oxygen kinetics in running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12), 2082-2088. DOI 0195-9131/01/3312-2082/\$3.00/0
- Billat, V., Mille-Hamard, L., Meyer, Y. y Wesfreid, E. (2009). Detection of changes in the fractal scaling of heart rate and speed in a marathon race. *Physical Activity*, 388(1): 3798-3808. DOI:10.1016/j.physa.2009.05.029.
- Blache, Y. y Monteil, K. (2012). Contralateral strength imbalance between dominant and non-dominant lower limb in soccer players. *Science and Sport*, 27: e1-e8. DOI:10.1016/j.scispo.2011.08.002.
- Bonacci, J., Chapman, A., Blanch, P., y Vicenzino, B. (2009). Neuromuscular adaptations to training, injury and passive interventions. *Sports Medicine*, 39(11), 903-921. DOI:10.2165/11317850-000000000-00000
- Brancaccio, P., Maffulli, N. y Limongelli, F. (2007). Creatine kinase monitoring in sport medicine. *British Medical Bulletin*, 81: 209–230. DOI: 10.1093/bmb/ldm014
- Brooks, G. A., Fahey, T. D., y White, T. P. (2005). *Exercise physiology: Human bioenergetics and its applications*. (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Boštjan y Šimunic (2012). Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. *Journal of Electromyography and Kinesiology* (22) 527–530.
- Brandão, C. (2009). "Posições oficiais 2008 da Sociedade Brasileira de Densitometria Clínica (SBDens)." *Arq Brasileira Endocrinologia Metabolica*, 53(1): 107-12.
- Brown, A., Zifchock, R. y Hillstrom, H. (2014). The effects of limb dominance and fatigue on running biomechanics. *Gait and Posture*, 39(3): 915-919. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.12.007>

- Budd, G.M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT) – its history and its limitations. *Journal Science Medical Sport*, 11:32.
- Burt, D., Lamb, K., Nicholas, C. y Twist, C. (2012). Effects of muscle-damaging exercise on physiological, metabolic, and perceptual responses during two modes of endurance exercise. *Journal of Exercise Science y Fitness*, 10: 70-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jesf.2012.10.003>
- Byrne, C., Twist, C. y Eston, R. (2004). Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage. *Sports Medicine*, 34(1): 49-69.
- Byrne, C. y Eston, R. (2002). Maximal intensity isometric and dynamic exercise performance following eccentric muscle action. *Journal of Sport Sciences*, 20(12): 951-959. DOI: 10.1080/026404102321011706
- Calbet, J. (2006). The rate of fatigue accumulation as a sensed variable. *Journal of Physiology*, 575(1): 688-699. DOI: 10.1113/jphysiol.2006.116087
- Calvo, R. (2015). Atletismo: Historia en Costa Rica. Diario Digital Crónica.cr [5 febrero 2015]. Recuperado desde <http://cronica.cr/especiales/atletismo-historia-en-costarica/>
- Carling, C., Reilly, T. y Williams, M. (2008). *Performance assessment on field sports*. New York, United States: Routledge: Taylor y Francis.
- Carpes, F., Mota, C. y Faria, I. (2010). On the bilateral asymmetry during running and cycling e A review considering leg preference. *Physical Therapy in Sport*, 11: 136-142. DOI:10.1016/j.ptsp.2010.06.005.
- Carrasco, L., Sañudo, B., de Hoyo, M. y Ochiana, G. (2011). Tensiomyographic characteristics of Rectus Femoris after a single bout of intense exercise. *Journal of Social Sciences*. 7 (3): 354-357. <http://dx.doi.org/10.3844/jssp.2011.354.357>
- Casamichana, D., Castellano, J., Calleja-González, J. y San Román, J. (2011). *The use of accelerometers to quantify the training load in soccer*. Poster presented at the 7th World Congress on Science y football, Mayo 26-30, Nagoya (Japan).
- Castellanos, J. y Casamichana, D. (2014). Deporte con dispositivos de posicionamiento global (GPS): Aplicaciones y limitaciones. *Revista de Psicología del Deporte*,

23(2): pp 355-364. Recuperado desde [http://www.rpd-online.com/article/viewFile/v23-n2-castellano-casamichana-gomez/pdf\\_es](http://www.rpd-online.com/article/viewFile/v23-n2-castellano-casamichana-gomez/pdf_es)

- Castillo I, Molina-García J. (2009). Adiposidad corporal y bienestar psicológico: efectos de la actividad física en universitarios de Valencia, España. *Revista Panamericana Salud Pública* ;26(4):334-40. Recuperado desde [http://www.uv.es/icastill/documentos/2009.CastilloMolina09\\_PAHO.pdf](http://www.uv.es/icastill/documentos/2009.CastilloMolina09_PAHO.pdf)
- Chang, W.L. Shih, Y. y Chen, W. (2012). Running injuries and associated factors in participants of ING Taipei Marathon. *Physical Therapy in Sport*, 13: 170-174. DOI:10.1016/j.ptsp.2011.08.001
- Chaudhuri, A. y Bahan, P. (2004). Fatigue in neurological disorders. *Lancet*, 363: 978-988. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(04\)15794-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(04)15794-2)
- Cheung, K., Hume, P.A. y Maxwell, L. (2003). Delay onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sports Medicine*, 33(2): 145-164. Recuperado desde [http://www.researchgate.net/publication/8075169\\_Delayed\\_onset\\_muscle\\_soreness\\_Treatment\\_strategies\\_and\\_performance\\_factors](http://www.researchgate.net/publication/8075169_Delayed_onset_muscle_soreness_Treatment_strategies_and_performance_factors)
- Cheuvront, S. y Haymes, E. (2001). Thermoregulation and Marathon Running: Biological and Environmental Influences. *Sports Medicine*; 31 (10), p.743-762.
- Clemente, V. (2011). Modificaciones de parámetros bioquímicos después de una maratón de montaña. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 27, 75-83. Recuperado desde <http://www.redalyc.org/pdf/2742/274222159005.pdf>
- Costa, R., Crockford, M., Moore, J. y Walsh, N. (2012). Heat acclimation responses of an ultra-endurance running group preparing for hot desert-based competition. *European Journal of Sport Science*, 14(1).
- Costill, D. L., Thomason, H., y Roberts, E. (1973). Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports*, 5(4), 248-252. DOI:10.1249/00005768-197300540-00007
- Coyle, E. (2007). Physiological regulation of marathon performance. *Sports Medicine*; 37 (4-5): 306-311. DOI 0112-1642/07/0004-0306/\$44.95/0
- Coyle, E. F. (1995). Substrate utilization during exercise in active people. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 61(4), 968S-979S.

- Coisier, M. (2002). Hamstring Muscle Strain Recurrence and Strength Performance Disorders. *American Journal of Sports Medicine*, 30(2): 199-213. DOI: 0363-5465/102/3030-0199\$02.00/0.
- Crouter, S., Antczak, A., Hudak, J., Della Valle, D y Haas, J. (2006). Accuracy and reliability of the ParvoMedics TrueOne 2400 and Medgraphics VO2000 metabolic systems. *European Journal of Applied Physiology*, 98(2), 139-151. DOI 10.1007/s00421-006-0255-0.
- Dahmane, R., Djordjevic, S., Simunic, B. y Valencic, V. (2005). Spatial fiber type distribution in normal human muscle Histochemical and tensiomyographical evaluation. *Journal of Biomechanics*, 38: 2451-2459. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.10.020>
- Dahmane, R., Valencic, V., Knez, N., Erzen, I. (2001). Evaluation of the ability to make noninvasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Medical Biologic Engineering and Computing*; 39(1): 51–5. DOI:10.1007/BF02345266.
- De Biasse, K. (2011). *Acclimation's Influence on Physically-fit Individuals: Marathon Race Results as a Function of Meteorological Variables and Indices* (Tesis de Doctorado): Arizona State University, United States of America.
- Deaner, R. O. (2006). More males mn fast: A stable sex difference in competitiveness in U.S.distance runners. *Evolution and Human Behavior*, 27, 63-84.
- Deaner, R., Master, K., Oagles, B. y LaCaille, R. (2011). Marathon performance as a predictor of competitiveness and training in men and women. *Journal of Sports Behavior*, 34(4): 325-342.
- Del Coso, .J., González-Millán, C., Areces, F., Ruiz, D., Gallo, C., Calleja-González, J. y Pérez-González, B. Sport Medicine Australia (2008). Beat the Heat: playing and exercising safely in hot weather. Folleto informativo, recuperado el día 13/02/2014 desde el sitio web: <http://sma.org.au/wp-content/uploads/2011/03/beat-the-heat-2011.pdf>
- Douglas, P., O'Toole, M., Hiller, W., Hackney, K. y Reichel, N. (1987). Cardiac fatigue after prolonged exercise. *Circulation*, 76:1206-1213. Recuperado desde <http://circ.ahajournals.org/content/76/6/1206.full.pdf>

- Ditroilo, M., Smith, I. J., Fairweather, M. M., y Hunter, A. M. (2013). Long-term stability of tensiomyography measured under different muscle conditions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(3), 558-563.
- Djordjevic S, Valencic V, Knez N, Dahmane R, Jurcic-Zlobec B, Bednarik J, Simunic B, Kersevan K y Godina N. (2000). Contractile properties of skeletal muscles of two groups of sportsmen-sprinters and cyclist measured by Tensiomyography. 2000 Pre-Olympic Congress, Brisbane, Australia, Abstract 220.
- Eijsvogels, T., Hoogerwerf, M., Maessen, M., Seeger, J., George, K., Hopman, M. y Thiejsen, D. (2015). Predictors of cardiac troponin release after a marathon. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18: 88-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2013.12.002>
- El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., Hauswirth, C. y Toussaint, J.F. (2012). Impact of Environmental Parameters on Marathon Running Performance. *Plosone*, 7(5) (e37407), p. 1-9.
- Ely, M., Martin, D., Chevront, S., y Montain, S. (2008). Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Medicine y Science in Sports y Exercise*, 40(9), 1675-1680. DOI 10.1249/MSS.0b013e3181788da9.
- Ergun, N., Islegen, C., Taskiran E, (2004). A cross-sectional analysis of sagittal knee laxity and isokinetic muscle strength in soccer players. *International Journal on Sports Medicine*, 25:594–598. DOI: 10.1055/s-2004-821116.
- Faude, O., Junge, A., Kindermann, W. y Dvorak, J. (2006). Risk factors for injuries in elite female soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 40: 785-790. DOI: 10.1136/bjism.2006.027540.
- Federación Costarricense de Atletismo (FECO A). (2016). Calendario de Ruta 2016. Recuperado desde <http://www.fecoa.org/calendario-de-ruta-2016/>
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., y MacIntosh, B. R. (2010). Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 1037-1046. DOI:10.1007/s00421-010-1582-8
- Fredericson, M., y Misra, A. K. (2007). Epidemiology and aetiology of marathon running injuries [abstract]. *Sports Medicine*, 37(4-5), 437-439. DOI:10.2165/00007256-200737040-00043

- Gandevia, S.C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiology Review*, 81: 1725-1789. Recuperado desde <http://physrev.physiology.org/content/81/4/1725.full-text.pdf+html>
- Gasparini, M., Sabovic, M, Gregoric, I., Simunic, B. y Pisot, B.(2012). Increased Fatigability of the Gastrocnemius Medialis Muscle in Individuals with Intermittent Claudication. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery* 44: 170-176.
- García-García, O. (2013). Relación entre parámetros de tensiomiografía y potenciales indicadores del rendimiento en ciclistas profesionales. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 13 (52): 771-781. Recuperado desde <Http://cdeporte.rediris.es/revista/revista52/artrelacion421.htm>
- García-García, O., Hernández-Mendo, A., Serrano-Gómez, V. y Morales-Sánchez, V. (2013). Aplicación de la teoría generalizabilidad a un análisis de tensiomiografía en ciclistas profesionales de ruta. *Revista de Psicología del Deporte*, 22(1):53-60. Recuperado desde [http://www.rpd-online.com/article/viewFile/v22-n1-garcia\\_garcia-hernandez\\_mendo-serrano\\_gomez-morales\\_sanchez/894](http://www.rpd-online.com/article/viewFile/v22-n1-garcia_garcia-hernandez_mendo-serrano_gomez-morales_sanchez/894)
- García-Manso J.M., Rodríguez-Matoso D., Sarmiento S., Y. de Saa, Vaamonde D., Rodríguez-Ruiz D. y da Silva-Grigoletto M.E. (2010). La tensiomiografía como herramienta de evaluación muscular en el deporte. *Revista Andaluz de Medicina del Deporte*. 3(3)98-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejvs.2012.04.024>
- García-Manso, J., Rodríguez-Ruiz, D., Rodríguez-Matoso, D., De Saa, Y., Sarmiento, S. y Quiroga, M. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *Journal of Sports Sciences*; 29(6): 619–625. DOI: 10.1080/02640414.2010.548822.
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Sarmiento, S., de Saa, Y., Vaamonde, D., Rodríguez-Ruiz, D., y Da Silva-Grigoletto, M. E. (2012). Effect of high-load and high-volume resistance exercise on the tensiomyographic twitch response of biceps brachii. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(4), 612-619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.01.005>
- González-Badillo, J.J. y Izquierdo, M. (2008). Fuerza muscular, propiedades biomecánicas del músculo. En Izquierdo, M. (2008). *Biomecánica y bases*

*neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.

- Gutiérrez-Vargas, R., Rojas-Valverde, D., Sánchez-Ureña, B y Salas-Cabrera, J. (2016). Perfil tensiomiográfico y antropométrico de atletas participantes en los juegos Centroamericanos y del Caribe Veracruz 2014. Manuscrito en Elaboración.
- Haney, T. (2010). Variability of pacing in marathon distance running. Thesis Maestría: University of Nevada, United States. 1-79. Recuperado desde <http://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1780&context=thesedissertations>
- Hanssen, H., Keithahn, A., Hertel, G., Drexel, V., Stern, H., Schuster, T., . . . Nickel, T. (2011). Magnetic resonance imaging of myocardial injury and ventricular torsion after marathon running [abstract]. *Clinical Science*, 120, 143-152. DOI:10.1042/CS20100206
- Hawley, J. A., y Spargo, F. J. (2007). Metabolic adaptations to marathon training and racing. *Sports Medicine*, 37(4-5), 328-331. DOI:10.2165/00007256-200737040-00014
- Holmich, P., Christensen, S. W., Darre, E., Jahnsen, F., y Hartvig, T. (1989). Non-elite marathon runners: Health, training and injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 23(3), 177-178. doi:10.1136/bjism.23.3.177
- Howe, A. S., y Boden, B. P. (2007). Heat-related illness in athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1384-1395. doi:10.1177/0363546507305013
- Hue, O, Voltaire, B., Galy, O., Costes, O., Callis, A., Hertogh, C. y Blanc, S. (2004). Effect of 8 days of acclimation on biological and performance response in a tropical climate. *Journal of Sports Medicine Physical Fitness*, 44:30-37.
- Hunter, A. M., Galloway, S. D., Smith, I. J., Tallent, J., Ditroilo, M., Fairweather, M. M., y Howatson, G. (2012). Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(3), 334-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.01.009>
- Instituto Meteorológico Nacional. (IMN). (2015). Promedio mensual de datos climáticos: estación 72179, San José, Pinilla. Departamento de Información, Kenneth Prado Cordero, San José, Costa Rica.

- International Association of Athletics Federations (IAAF). (2014). Reglas de Competición. [www.iaaf.org](http://www.iaaf.org)
- Izquierdo, M., González-Badillo, J.J., Hakkinen, K., Kraemer, W.J., Ratamess y Gorostiaga, E.M. (2008). En Izquierdo, M. (2008). Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Jeukendrup, A. E., y Wallis, G. A. (2005). Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *International Journal of Sports Medicine*, 26(S 1), S28-S37. DOI:10.1055/s-2004-830512
- Johnston, R., Watsford, M., Kelly, S., Matthew, P., Spurrs, R. (2013). The validity and reliability of 10Hz and 15Hz GPs units for assessing athlete movement demands. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(6), 1649-1655. DOI: 10.1519/JSC.0000000000000323.
- Jones, H. (2003). *The Expert's Guide to Marathon Training*. London, United Kingdom: Carlton Books LTD.
- Joyner, M. J., y Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35-44. DOI:10.1113/jphysiol.2007.143834
- Kayser, B. (2003). Exercise starts and ends in the brain. *European Journal of Applied Physiology*, 90: 441-449. DOI 10.1007/s00421-003-0902-7
- Kenefick, R.W., Ely, F.R., Chevront, F.R., Palombo, L.J., Goodman, D.A. y Sawka, M.N. (2009) Prior Heat Stress: Effect on Subsequent 15-min Time Trial Performance in the Heat. *Medicine Science Sports Exercise*, 41: 1311-1316. <http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181988c14>
- Kim, Y., Shin, Y., Lee, J., Lee, Y., Shin, K., Kim, A., Goh, C., Kim, C., Oh, J., Min, Y. y Yang, H. (2014). The effects of running a 308 km ultra-marathon on cardiac markers. *European Journal of Sport Science*, 14 (1), p. 92-97. <http://dx.doi.org/10.1080/17461391.2011.654267>
- Knez, N., Valencic, V. (2000). Proceedings of the ninth Electrocehnical and Computer Science Conference ERK 2000, 21-23, September 2000, Portoroz, Slovenia. Ljubljana, pp. 301-304.

- Kokkonen, J., Nelson, A., Cornwel, I.A. (1998). Acute muscle stretching inhibits maximal strength performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69:411–415. <http://dx.doi.org/10.1080/02701367.1998.10607716>.
- Kolata, G. (2012). How long does it takes to recover from a marathon? Diario digital The New York times (19 marzo 2012). Recuperado desde [http://well.blogs.nytimes.com/2012/03/19/how-long-does-it-take-to-recover-from-a-marathon/?\\_r=0](http://well.blogs.nytimes.com/2012/03/19/how-long-does-it-take-to-recover-from-a-marathon/?_r=0)
- Kraemer, W., Fleck, S. y Deschenes, M. (2012). Exercise Physiology: Intergrating Theory and Application. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins. Pp. 53
- Kratz, A., Lewandrowski, K. B. Siegel, A. J., Chun, K. Y., Flood, J. G., Van Cott, E. M. y Lee-Lewandrowski, E. (2002). Effect of Marathon Running on Hematologic and Biochemical Laboratory Parameters, Including Cardiac Markers. *American Journal of Clinical Pathology* 118(6), 856-863. <http://dx.doi.org/10.1309/14TY-2TDJ-1X0Y-1V6V>
- Krizaj, D., Simunic, B. y Zagar, T. (2008). Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18: 645-651. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.01.008>
- Kyrolainen, H., Pullinen, T., Candau, R., Avela, J., Huttunen, P., y Komi, P. V. (2000). Effects of marathon running on running economy and kinematics [abstract]. *European Journal of Applied Physiology*, 82(4), 297-304. <http://dx.doi.org/10.1007/s004210000219>
- Lobo-Di Palma, J. (2010). La carrera pedestre por la línea del tren, San José Puntarenas 1914-1938. Revista Electrónica de Historia: Diálogos, 11(1). Recuperado desde <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/dialogos/article/view/6107/5813>
- Loturco, I., Gil, S., Laurino, C.F., Roschel, H., Kopal, R., CalAbad, C.C., y Nakamura, F.Y. (2015). Differences in muscle mechanical properties between elite power and endurance athletes: a comparative study. *J Strength Cond Res* 29(6): 1723–1728. DOI: 10.1519/JSC.0000000000000803
- Lovell, T., Sirotic, A., Impellizeri, F. & Coutts, A. (2013). *Factors affecting perception of effort (session rating of perceived exertion) during Rugby League training*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(1), 62-69.

- Lucas, J. (1976). A history of the Marathon Race 490a.c. to 1975. Pennsylvania State University, United States. Recuperado desde <http://library.la84.org/SportsLibrary/JSH/JSH1976/JSH0302/jsh0302d.pdf>
- Lundstrom, J. (2015). *Plyometric Training, Running Economy, and Marathon Running*. (Tesis de doctorado): University of Minesota, United States of America: 1-207. Recuperado desde [http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/171434/Lundstrom\\_umn\\_0130E\\_15846.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/171434/Lundstrom_umn_0130E_15846.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Maciejczyk, M., Wiecek, M., Szymura, J., Szygula, Z., y Brown, L.E. (2015). Influence of increased body mass and body composition on cycling anaerobic power. *Journal of Strength Conditioning Research*, 29(1): 58–65.
- Maron, M., Horvath, M., Wilkerson, J. y Gliner, A. (1976). Oxygen uptake measurements during competitive marathon running. *Journal of Applied Physiology*, 40(1): 836-838. Recuperado desde <http://jap.physiology.org/content/40/5/836>
- Maron, B., Poliac, L. y Roberts, W. (1996). Risk for sudden cardiac death associated with marathon running. *Journal of American College of Cardiology*, 28: 428-431. DOI:10.1016/0735-1097(96)00137-4
- Martola, M., Lindqvist, C., Hannien, H. y Al-Sukhun, J. (2006). Fracture of titanium plates used for mandibular reconstruction following ablative tumor surgery. *Journal of Biomedical Material Research*, 80(2): 345-352. DOI: 10.1002/jbm.b.30603
- Martin, D. y Coe, P. (2007). *Entrenamiento para corredores de fondo y medio fondo*. España: Editorial Paidotribo, Barcelona.
- Maughan, R. J., y Miller, J. D. (1983). Incidence of training-related injuries among marathon runners. *British Journal of Sports Medicine*, 17(3), 162-165. DOI: 10.1136/bjism.17.3.162
- McAdele, W., Katch, F. y Katch V. (2015). *Exercise physiology*. 8<sup>th</sup> Ed. Baltimore: Wolters Kluwer Health. Pp 233.

- Méndez-Villanueva, A. y Bishop, D. (2008). Mecanismo de fatiga neuromuscular en humanos. En Izquierdo, M. (2008). Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte. Editorial Médica Panamericana, Madrid, España.
- Mendoza, A. (2015). Federación de Atletismo avalará más de 130 carreras para el 2015. Diario digital crhoy.com (28 enero 2015), Costa Rica. Recuperado desde <http://www.crhoy.com/federacion-de-atletismo-avalara-mas-de-130-carreras-para-el-2015/>
- Merletti, R., Conte, L., y Sathyan, D.. (1995). Repeatability of electrically-evoked myoelectric signals in human tibialis anterior muscle. *Journal Electromyography Kinesiology*. 5(2): 67–80. [http://dx.doi.org/10.1016/1050-6411\(94\)00004-6](http://dx.doi.org/10.1016/1050-6411(94)00004-6)
- Millet, G. y Lepers, R. (2004). Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing. *Sports Medicine*, 34: 105-116. DOI 0112-1642/04/0002-0105/\$31.00/0
- Millet, G., Tomazin, K., Verges, S., Vicent, C., Bonnefoy, R., Boisson, R.C., Gergelé, L., Féasson, L y Martín, V. (2011). Neuromuscular consequences of an extreme mountain Ultramarathon. *PLoS ONE*, 6(2): e17059. DOI:10.1371/journal.pone.0017059
- Mohammed, A y Thomson, M. (2012). Consequences of rising humidity level on circulatory responses during prolonged intense running. *Movement, Health & Exercise*, 1(1), p. 11-23.
- Montgomery, P., Pyne, D., & Minahan, C. (2010). *The physical and physiological demands of basketball training and competition*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(1), 75-86.
- Moran, D.S. (2001). Potential Applications of Heat and Cold Stress Indices to Sporting Events. *Sports Medicine*, 31:909-917
- Muller, N.. (2012). The founder of the marathon. *Distance Running*, 3: 41-43. Recuperado desde <http://aimsworldrunning.org/documents/2012.e3.41-44.Breal.pdf>
- Murasse, S., Terazawa, E., Queme, F., Ota, H., Matsuda, T., Hirate, K., Kozaki, Y., Katanosaka, K., Taguchi, T., Urai, H. y Mizumura, K. (2010). Bradikinin and nerve growth factor play pivotal roles in muscular mechanical hiperalgesia after

- exercise (DOMS). *The Journal of Neuroscience*, 30(10): 3752-3761.  
<http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3803-09.2010>
- Neilan, T., Januzzi, J., Lee-Lewandrowski, E., Ton-Nu, T., Yoerger, D., Jassal, D., Lewandrowski, K., Siegel, A., Marshall, J., Douglas, P. Lawlor, D., Picard, M. y Wood, M. (2006). Myocardial injury and ventricular dysfunction related to training levels among nonelite participants in the Boston marathon. *Circulation*, 114(1): 2325-2333. Recuperado desde <http://circ.ahajournals.org/content/114/22/2325.full.pdf+html>
- Newton, R., Gerber, A., Nimphius, S., Shim, J. Doan, B., Robertson, M., Pearson, D., Craic, B., Hakkinen, K. y Kraemer, W. (2001). Determination of functional strength imbalance of the lower extremities. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 971–977. <http://dx.doi.org/10.1519/R-5050501x.1>
- Nieman, D.D. y Lee, J. (1990). Infectious episodes in runners before and after the LA Marathon. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 30: 316-328.
- Nieman, D. C., Henson, D. A., Fagoaga, O. R., Utter, A. C., Vinci, D. M., Davis, J. M., y Nehlsen-Cannarella, S. L. (2002). Change in salivary IgA following a competitive marathon race. *International Journal of Sports Medicine*, 23(01), 69-75. DOI:10.1055/s-2002-19375
- Noakes, T. D. (2001). *Lore of running*, 4E. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Norcross, J. y Van Loan, MD. (2004). Validation of fan beam dual energy x ray absorptiometry for body composition assessment in adults aged 18–45 years. *British Journal of Sports Medicine*, 38:472-476. DOI:10.1136/bjism.2003.005413
- Norton, C. (2010). Formula one drivers feel the G-force. Diario digital Telegraph [10 mayo 2010]. Recuperado desde <http://www.telegraph.co.uk/motoring/motorsport/7681665/Formula-One-drivers-feel-the-G-force.html>
- Nybo, L. y Nielsen, B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 91(1): 1055-1060. Recuperado desde <http://jap.physiology.org/content/91/3/1055.full-text.pdf+html>

- Ortega, R. y Velasco, M. (2009). *De la milla al maratón: entrenamiento para corredores de élite y recreativos, jóvenes y veteranos, sanos y enfermos*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Pate, R. R., Macera, C. A., Bailey, S. P., Bartoli, W. P., y Powell, K. E. (1992). Physiological, anthropometric, and training correlates of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(10), 1128-1133. DOI:10.1249/00005768-199210000-00010
- Perotto, A., Delagi, E., Iazetti, J., y Morrison D. (2011). *Anatomic guide for the electromyographer: The limbs and trunk*. Charles Springfield, United States: C. Thomas Publisher LTD, 5<sup>th</sup> Ed.
- Pfitzinger, P. y Douglas, S. (2012). *Plan de entrenamiento avanzado para maratón*. Madrid. España: Ediciones Tutor S.A., pp 19-161.
- Plowman, S. y Smith, D. (2014). *Exercise Physiology for health Fitness and Performance*. 4<sup>th</sup> Ed. Estados Unidos de América: LWW
- Powers, S. y Howley, E. (2012). *Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance*. New York, United States of America: Editorial McGraw Hill, 8<sup>th</sup> Ed.
- Quinn, T. y Manley, M. (2012). The impact of a long training run on muscle damage and running economy in runners training for a marathon. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 10: 101-106. DOI:10.1016/j.jesf.2012.10.008
- Rae, D. E., Vignaud, A., Butler-Browne, G. S., Thornell, L., Sinclair-Smith, C., Derman, E.W., ... Collins, M. (2010). Skeletal muscle telomere length in healthy, experienced endurance runners [abstract]. *European Journal of Applied Physiology*, 109(2), 323. DOI: 10.1007/s00421-010-1353-6
- Radakovic SS, Donja S, Maric J, Subatovic M, Radjen S, Stefanova E, Stankovic N, Filipovic N (2007) Effects of Acclimation on Cognitive Performance in Soldiers during Exertional Heat Stress. *Mil Med* 172:133-136. <http://dx.doi.org/10.7205/MILMED.172.2.133>
- Rey, E., Lago-Peñas, C., Lago-Ballesteros, J. (2012). Tensiomyography of selected lower-limb muscles in professional soccer players. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22:866–872. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.06.003>

- Rey E, Lago-Peñas C, Lago-Ballesteros J, Casáis L (2012). The effect of recovery strategies on contractile properties using tensiomyography and perceived muscle soreness in professional soccer players. *Journal of Strength Conditioning Research*, 26:3081–3088. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182470d33
- Roberts, W. O. (2000). A 12-yr profile of medical injury and illness for the twin cities marathon. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(9), 1549-1555. DOI:10.1097/00005768-200009000-00004
- Rodríguez, J. (2013). Costa Rica es el que más organiza carreras pedestres a nivel latinoamericano. Versión digital del diario La Nación, Costa Rica, 1 de septiembre de 2013. Recuperado el día 13/2/2014 desde [http://www.nacion.com/deportes/atletismo/Costa-Rica-carreras-pedestres-latinoamericano\\_0\\_1363463737.html](http://www.nacion.com/deportes/atletismo/Costa-Rica-carreras-pedestres-latinoamericano_0_1363463737.html)
- Rodríguez, J. (2014). Atletismo espera este año 165 carreras. Versión digital del diario La Nación, Costa Rica, 26 enero 2014. Recuperado el día 13/2/2014 desde [http://www.nacion.com/deportes/Atletismo-espera-ano-carreras\\_0\\_1392860793.html](http://www.nacion.com/deportes/Atletismo-espera-ano-carreras_0_1392860793.html)
- Rodríguez-Matoso, D. (2013). *Aplicación de la tensiomiografía en la evaluación de la respuesta muscular en adaptación agudas y crónicas al ejercicio físico* (Tesis doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Recuperado desde [http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/10713/4/0686887\\_00000\\_0000.pdf](http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/10713/4/0686887_00000_0000.pdf)
- Rodríguez-Matoso D., García-Manso J.M., Sarmiento S., Y. de Saa, Vaamonde D., Rodríguez-Ruiz D. y da Silva-Grigoletto M.E. (2012). Evaluación de la respuesta muscular como herramienta de control en el campo de la actividad física, la salud y el deporte. *Revista Andaluz de Medicina del Deporte*. 5(1) 28-40. Recuperado desde <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323327669006>
- Rodríguez-Matoso, D.; Rodríguez-Ruiz, D.; Quiroga, M.E.; Sarmiento, S.; De Saa, Y. y García-Manso, J.M. (2010). Tensiomiografía, utilidad y metodología en la evaluación muscular. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 10(40): 620-629. Recuperado desde <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista40/artcaracteristicas186.pdf>

- Rogers, M.A., Stull, G.A. y Apple, F.S. (1985). Creatine Kinase isoenzyme activities in men and women following a marathon race (abstract). *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17(6): 679-682.
- Rojas-Valverde, D., Gutiérrez-Vargas, R., Sánchez-Ureña, B., Gutiérrez Vargas, J.C., Hernández-Castro, A. y Salas-Cabrera, J. (2016). Estado Del Balance Neuromuscular Y Masa Magra De Extremidades Inferiores De Jugadores Profesionales De Fútbol De La Primera División De Costa Rica: Un Abordaje Tensiomiográfico. *Revista Apunts: Educación Física y Deporte*. En revisión.
- Rojas-Valverde, D., Gutiérrez-Vargas, R., Sánchez-Ureña, B., Gutiérrez Vargas, J.C., Cruz-Fuentes, I. y Salas-Cabrera, J. (2015). Comportamiento Neuromuscular Posterior A La Competencia En Jugadores Profesionales De Fútbol De Costa Rica: Un Seguimiento Tensiomiográfico. *Revista Pensar en Movimiento: Ciencias del Ejercicio y la Salud*. DOI: 10.15517/pensarmov.v13i2.19246.
- Ruiz-Juan, F. y Zarauz, A. (2014). Análisis de la motivación en corredores de maratón españoles. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 46(1): 1-11. DOI:10.1016/S0120-0534(14)70001-9
- Rusu, F., Cosma, G., Cernaianu, S., Marin, M., Rusu, P., Ciocănescu, D. y Neferu, N. (2013). Tensiomyography method used for neuromuscular assessment of muscle training. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 10: 67. <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-10-67>
- Sánchez-González, J., Rivera-Cisneros, A. and Tovar Luz, J. (2003) Asociación de las respuestas fisiológicas a los cambios metabólicos, en el ejercicio físico extenuante. *Cirugía y Cirujanos* 71, 217-225. Recuperado desde <http://www.medigraphic.com/pdfs/circir/cc-2003/cc033h.pdf>
- Satterthwaite, P., Norton, R., Larmer, P., y Robinson, E. (1999). Risk factors for injuries and other health problems sustained in a marathon [abstract]. *British Journal of Sports Medicine*, 33(1), 22-26. DOI:10.1136/bjism.33.1.22
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., y Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7), 465-485. DOI:10.2165/00007256-200434070-00005

- Sayers, S. y Clarkson, P. (2001). Force recovery after eccentric exercise in males and females. *European Journal of applied Physiology*, 84(1-2): 122-126. <http://dx.doi.org/10.1007/s004210000346>
- Schewellnus, M. (2007). Calambres musculares en el maratón: etiología y factores de riesgo. *Sports Medicine*, 37 (4-5): 364-367. Recuperado desde <http://gse.com/es/fisiologia-del-ejercicio/articulos/calambres-musculares-en-el-maraton-etilogia-y-factores-de-riesgo-1258>
- Sears, E. (2008). *Running Through the ages*. North Carolina, United States: McFarland.
- Seeley, M., Umberger, B., Clasey, J. Shapiro, R. (2010). The relation between mild leg-length inequality and able-bodied gait asymmetry. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9: 572-579. Recuperado desde <http://www.jssm.org/vol9/n4/6/v9n4-6pdf.pdf>.
- Siegel, A. J., Lawrence, M.D., Silverman, M. and Lopez, R. E. (1980) Creatine kinase elevations in marathon runners: relationship to training and competition [abstract]. *The Yale Journal of Biology and Medicine* 53, 275-279. Recuperado desde <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2595821/pdf/yjbm00121-0006.pdf>
- Siegel, A. J., Verbalis, J. G., Clement, S., Mendelson, J. H., Mello, N. K., Adner, M., Shirey, T., Glowacki, J., Lee-Lewandrowski, E. and Lewandrowski, K. B. (2007). Hyponatremia in Marathon Runners due to Inappropriate Arginine Vasopressin Secretion. *The American Journal of Medicine* 120, 461.e11-461.17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amjmed.2006.10.027>
- Simunic, B. (2003). Model of longitudinal contractions and transverse deformations in skeletal muscles. Doctoral Thesis. Ljubljana.
- Smith, L. (1991). Acute inflammation: the underlying mechanism in DOMS? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(5): 542-551. <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-199105000-00006>
- Smith, J.E., Garbutt, G., Lopes, P. and Tunstall Pedoe, D. (2004). Effects of prolonged strenuous exercise (marathon running) on biochemical and haematological markers used in the investigation on of patients in the emergency department.

- British Journal of Sports Medicine* 38, 292-294. 06/1991; 23(5):542-51.  
<http://dx.doi.org/10.1136/bjism.2002.002873>
- Soderman, K., Alfredson, H., Pietila, T. Werner, S. (2001). Risk factors for leg injuries in female soccer players: a prospective investigation during one out-door season. *Knee Surgery Sports Traumatology and Arthroscopy*, 9: 9313-321. DOI 10.1007/s001670100228.
- Sport Medicine Australia (2008). Beat the Heat: playing and exercising safely in hot weather. Folleto informativo, recuperado el día 13/02/2014 desde el sitio web: <http://sma.org.au/wp-content/uploads/2011/03/beat-the-heat-2011.pdf>
- Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R., y Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 36(2), 95-101. DOI:10.1136/bjism.36.2.95
- Tous-Fajardo, J., Moras, G., Rodríguez-Jiménez, S., Usach, R., Doutres, D. M., y Maffiuletti, N. A. (2010). Inter-rater reliability of muscle contractile property measurements using non-invasive tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(4), 761-766. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.02.008>
- Umbel, J., Hoffman, R., Dearth, D., Chleboun, T., Manini, T. y Clark, B. (2009). DOMS induced by low-load blood flow-restricted exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 107(6): 687-695. DOI: 10.1007/s00421-009-1175-6
- Van Middelkoop, M., Kolkman, J., Van Ochten, J., Bierma-Zeinstra, S. M., y Koes, B. (2008). Prevalence and incidence of lower extremity injuries in male marathon runners [abstract]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(2), 140-144. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00683.x>
- Valencic V., Djordjevic S., Knez N., Dahmane R., Coh M, Jurcic-Zlobec B., Praprotnik U., Simunic B., Kersevan K., Bednarik J., Gomina, N. (2000). Contractile properties of skeletal muscles detection by tensiomyographic measurement method. 2000 Pre-Olympic Congress, Brisbane, Australia, Abstract 507.
- Valencic, V, Knez, N. (1997). Measuring of skeletal muscle's dynamic properties. *Artif Organs*, 21:240–242. DOI: 10.1111/j.1525-1594.1997.tb04658.x.

- Wallace RF, Kriebel D, Punnett L, Wegman DH, Wenger CB, Gardner JW, Gonzales RR (2005) The effects of continuous hot weather training on risk of exertional heat illness. *Medicine Science Sports Exercise*, 37:84-90. <http://dx.doi.org/10.1249/01.MSS.0000150018.90213.AA>
- Warhol, M. J., Siegel, A. J., Evans, W. J., y Silverman, L. M. (1985). Skeletal muscle injury and repair in marathon runners after competition [abstract]. *The American Journal of Pathology*, 118(2), 331.
- Williams, K. R., y Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology*, 63(3), 1236-1245.
- Wilmore, J. y Costill, D. (2005). *Fisiología del Esfuerzo y del Deporte*. Barcelona: Editorial Paidotribo.
- World Medical Association (WMA). (1964). Helsinki Declaration: ethical principles of humans beens medical research. Recuperado desde <http://www.wma.net/es/30publications/10policies/b3/>
- Wyatt, M. y Edwards, A. (1981). Comparison of Quadriceps and Hamstring Torque Values during Isokinetic Exercise. *The Journal Of Orthopaedic And Sports Physical Therapy*, 3(2): 48-59. Doi: 01 96-601 1 /81/0302-0048\$02.00/0.
- Yared, K., y Wood, M. J. (2009). Is marathon running hazardous to your cardiovascular health? the jury is still out [abstract]. *Radiology*, 251(1), 3-5. DOI: 10.1148/radiol.2511090041
- Yeung, S.S., Yeung, E.W. y Wong, T.W.(2001). Marathon finishers and non-finishers characteristics: a preamble to success. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41: 170-176. Recuperado desde [http://www.researchgate.net/publication/11894827\\_Marathon\\_finishers\\_and\\_non-finishers\\_characteristics\\_A\\_preamble\\_to\\_success?enrichId=rgreq-8b9b81f0-eaa9-450f-960f-186c0e4d52eb&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzExODk0ODI3O0FTOjEyNzAyMTU4OTk5NTUyNUAxNDA3Mjk1NzE1OTQx&el=1\\_x\\_2](http://www.researchgate.net/publication/11894827_Marathon_finishers_and_non-finishers_characteristics_A_preamble_to_success?enrichId=rgreq-8b9b81f0-eaa9-450f-960f-186c0e4d52eb&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzExODk0ODI3O0FTOjEyNzAyMTU4OTk5NTUyNUAxNDA3Mjk1NzE1OTQx&el=1_x_2)

