



universidad  
de león

Departamento de Ingeniería  
y Ciencias Agrarias

**Estrés térmico en el Personal Especialista en  
Extinción de Incendios Forestales, variables  
ambientales e influencia del traje de protección**

**Ana Belén Carballo Leyenda  
León, 2017**

## FE DE ERRATAS

Se hace constar que con posterioridad a la impresión de la tesis, se han advertido los siguientes errores:

-Página 160 en la última fila de la Tabla 6.2 donde pone "Clase 4  $q < 7000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ " debe aparecer "Clase 4  $q > 7000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ".

- Página 161 en la última fila de la Tabla 6.3 donde pone " Clase  $q < 7000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ " debe aparecer " Clase  $q > 7000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ".



# UNIVERSIDAD DE LEÓN

**Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias**

## **Estrés térmico en el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales, variables ambientales e influencia del traje de protección**

**Tesis doctoral**

Memoria presentada para optar al título de Doctor en el Programa de Ingeniería de Biosistemas

Presenta:

**Ana Belén Carballo Leyenda**

Directores: *Dr. Jose Antonio Rodríguez Marroyo*

*Dr. José Gerardo Villa Vicente*

León, 2017



Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e Instituciones que de manera directa o indirecta han participado y contribuido al desarrollo de esta Tesis Doctoral y, de manera muy especial:

A mis directores de Tesis, el Dr. Jose Antonio Rodríguez Marroyo y el Dr. José Gerardo Villa Vicente, por vuestro compromiso conmigo durante todos estos años, sin el que no habría llegado hasta aquí, por confiar en mis posibilidades, por vuestro tiempo. Gracias por apostar por mí y haberme dado vuestra amistad.

A TRAGSA, por haber creído en la relevancia de esta investigación y el haberla fomentado e impulsado con varios proyectos y contratos. Gracias por permitir al Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales, y a los preparadores físicos participar en esta investigación.

A todo el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales que ha participado desinteresadamente en el desarrollo de esta Tesis, "sufriendo" en las pruebas de laboratorio y llevando los equipos de registro en los incendios. Sin vuestro compromiso no hubiera sido posible desarrollar esta investigación. Gracias por haberme dado la oportunidad de profundizar en el conocimiento de vuestro trabajo.

Al Dr. Jorge López Satué, por haberme dado la oportunidad de venir a León y entrar en contacto con la investigación, hace ya 9 años. Por contribuir a mi formación con tus conocimientos, por enseñarme lo que es la capacidad de trabajo, por apoyarme y sobre todo por aguantarme. Gracias.

A Pedro Andrés Fernández, por ser el alma del Departamento de Educación Física y Deportiva, por las risas, por facilitarme la vida desde el primer día, por tu amistad.

A Raúl Pernía, por ser mis ojos, mis manos y mis oídos en las fases de campo. Por tu profesionalidad y saber hacer. Por tu ayuda desinteresada. Gracias Perny.

A Marcos López, David Suárez y a la Dra. Pilar Sánchez Collado, por vuestra ayuda en el laboratorio, por las charlas, el apoyo y la amistad.

Un recuerdo muy especial para la Dra. Concepción Ávila Ordás, que aunque ya no está con nosotros, ha dejado una huella imborrable en mí.

A mi familia, sin vuestra ayuda yo no sería quién soy, en especial a Loli, Vane y Facu, a mis sobrinos Noel, Alba e Isma, por vuestro incondicional apoyo y cariño. A Nidi, por ser el pilar de mi vida.

*A Nidi, siempre*



**La presente Tesis Doctoral se ha podido desarrollar en todas sus facetas gracias a los siguientes proyectos y contratos de investigación:**

“Estrés térmico en extinción de incendios forestales: análisis en fuegos reales y en función de diferentes tipos de traje de protección en pruebas de laboratorio”. Ministerio de Economía y Competitividad y FEDER. Proyectos de I+D correspondientes al programa estatal de fomento de la investigación científica y técnica de excelencia, subprograma estatal de generación de conocimiento 2016. (Resolución de 16 de diciembre de 2016, de la Secretaría de Estado de Investigación). 2016-2019.

“Test de laboratorio para la evaluación del estrés térmico del personal especialista en incendio forestales y análisis de potenciales desordenes cardiovasculares y termo-regulatorios inducidos por el ambiente de trabajo”. Contrato de investigación entre el Grupo de Investigación VALFIS del Instituto de Biomedicina de la Universidad de León y la Empresa TRAGSA en el marco del proyecto AF3 “Advance Forest Fire Fighting”, proyecto en colaboración financiado por la Unión Europea a través del Séptimo Programa Marco FP7. 2015.

“Trabajos de laboratorio y análisis estadístico de los datos fisiológicos obtenidos sobre personal especialista en extinción de incendios forestales de INFOCA en el curso del proyecto I+D+i CREIF”. Contrato de investigación Universidad de León-EGMASA (Empresa de Gestión Medioambiental). 2009.

“Estudio de los factores condicionantes del rendimiento físico del personal especialista en extinción de incendios forestales”. Proyecto de investigación Universidad de León - TRAGSA - Mutua Fraternidad. 2006-2008.

**Parte de los resultados de esta memoria han sido objeto de las siguientes publicaciones:**

Carballo B, Villa JG, López-Satué J, Rodríguez-Marroyo JA. Impact of Different Personal Protective Clothing on Wildland Firefighters' Physiological Strain. *Front Physiol.*(en revisión).

**Parte de los resultados de esta memoria han sido objeto de las siguientes comunicaciones:**

López-Satué J, Gómez R, Aguirre F, Raboso P, Carballo B, Rodríguez-Marroyo JA, Villa JG. PROYECTO CREIF: principales conclusiones obtenidas y extrapolación a otros ámbitos forestales. Comunicación Oral. 6º Congreso Forestal Español. Victoria-Gasteiz. Junio de 2013.

Rodríguez-Marroyo JA, Villa, JG, López-Satué J; Pernía R, Carballo B, García J, Foster, C. Physiological and thermal strain of wildland firefighters. Póster. DVIII Annual Meeting and II World Congress on Exercise and Medicine (ACSM, 2011). Denver, Colorado, USA. Junio de 2011.

Carballo B, López-Satué J, Gómez-Molino R, Raboso P, Enríquez E, Rodríguez-Marroyo JA, Pernía R, Ávila MC, García, J, Villa JG. Performance factors during wildfire suppression in spanish wildland firefighters. Póster. V Congreso Internacional sobre Incendios Forestales. South África. Mayo de 2011.

Carballo AB, López-Satué J, Ávila MC, Pernía R, Rodríguez-Marroyo JA, García-López J, Villa JG. Respuesta fisiológica al estrés térmico en el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales (PEEIF). Comunicación Oral. XIII Congreso Nacional de la Federación Española de Medicina del Deporte. Bilbao. Del 28 al 30 de octubre de 2010.



## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS

$\alpha$	significación estadística.
$\beta$	potencia estadística.
%	porcentaje.
$\Delta$	incremento.
~	aproximadamente.
<	menor que.
>	mayor que.
$\geq$	mayor o igual que.
$\leq$	menor o igual que.
$\Sigma$	sumatorio.
<b>ACSM</b>	American College of Sports Medicine.
$A_D$	área corporal de DuBois.
<b>BM</b>	<i>body mass</i> , masa corporal.
<b>BRIF</b>	Brigada de Refuerzo en Incendios Forestales.
<b>C</b>	convección.
$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	caloría por segundo y metro cuadrado.
<b>CAR</b>	Cuadrilla de Acción Rápida.
<b>CCAA</b>	Comunidades Autónomas.
<b>CDF</b>	Centro de Defensa contra el Fuego.
<b>CEDEFO</b>	Centro de Defensa Forestal.
<b>cm</b>	centímetro.
$\text{cm}^{-2}$	centímetros cuadrados.
<b>CNSST</b>	Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.
<b>CO</b>	monóxido de carbono.
$c_p$	calor específico.

<b>C<sub>res</sub></b>	convección respiratoria.
<b>d</b>	tamaño del efecto.
<b>DGDRPF</b>	Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal.
<b>DRY</b>	transferencia de calor seco.
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> , por ejemplo.
<b>ECG</b>	electrocardiograma.
<b>EEM</b>	error estándar de la media.
<b>EFFIS</b>	European Forest Fire Information System.
<b>EGIF</b>	Estadística General de Incendios Forestales.
<b>EPI</b>	Equipo de Protección Individual.
<b>E<sub>req</sub></b>	evaporación requerida o necesaria.
<b>E<sub>res</sub></b>	evaporación respiratoria.
<b>E<sub>sk</sub></b>	evaporación de sudor de la piel.
<b>et al.</b>	<i>et alii</i> , y otros.
<b>F</b>	pendiente del tapiz.
<b>FA</b>	factor de atenuación.
<b>FC</b>	frecuencia cardiaca.
<b>FC<sub>max</sub></b>	frecuencia cardiaca máxima.
<b>FS</b>	fondo de escala.
<b>g</b>	gramo.
<b>g·h<sup>-1</sup></b>	gramo por hora.
<b>g·m<sup>-2</sup></b>	gramo por metro cuadrado.
<b>h</b>	hora.
<b>ha</b>	hectárea.
<b>HAP</b>	hidrocarburos aromáticos policíclicos.
<b>HR</b>	humedad relativa.

<b>Hz</b>	hercio.
<i>i.e.</i>	<i>id est</i> , es decir.
<b>IC</b>	intervalo de confianza.
<b>IMC</b>	índice de masa corporal.
<b>ISO</b>	Organización Internacional para la Normalización.
<b>I<sub>t</sub></b>	aislamiento térmico.
<b>K</b>	conducción.
<b>kcal</b>	kilocaloría.
<b>kcal·d<sup>-1</sup></b>	kilocaloría por día.
<b>kcal·min<sup>-1</sup></b>	kilocaloría por minuto.
<b>kg</b>	kilogramo.
<b>kg·m<sup>-2</sup></b>	kilogramo por metro cuadrado.
<b>km</b>	kilómetro.
<b>km·h<sup>-1</sup></b>	kilómetro por hora.
<b>kW·m<sup>-2</sup></b>	kilovatio por metro cuadrado.
<b>(kW·m<sup>-2</sup>)<sup>4/3</sup>·s</b>	kilovatio por metro cuadrado y segundo.
<b>L·min<sup>-1</sup></b>	litro por minuto.
<b>ln</b>	logaritmo neperiano.
<b>M</b>	calor metabólico.
<b>m</b>	metro.
<b>m<sup>-2</sup>·K·W<sup>-1</sup></b>	metro cuadrado kelvin por watio.
<b>m<sup>-2</sup>·°C·W<sup>-1</sup></b>	metro cuadrado grado centígrado por watio.
<b>m<sup>2</sup>·Pa·W<sup>-1</sup></b>	metro cuadrado pascal por watio.
<b>MAPAMA</b>	Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
<b>MARM</b>	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
<b>MET</b>	equivalente metabólico.

$\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	microvoltio por vatio y metro cuadrado.
$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	miligramo por metro cúbico.
<b>min</b>	minuto.
$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}$	mililitro por kilogramo.
$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	mililitro por kilogramo de peso por minuto.
<b>mm</b>	milímetro.
$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	milimoles por litro.
<b>n</b>	tamaño de la muestra.
$\eta_p^2$	eta parcial al cuadrado.
$^{\circ}\text{C}$	grados centígrados.
$^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	grado centígrado por minuto.
$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	grado centígrado por segundo.
<b>p</b>	nivel de significación.
<b>PEEIF</b>	Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales.
<b>ppm</b>	pulsaciones por minuto.
$\text{ppm}^{-1}$	partes por millón.
<b>PSI</b>	índice de estrés fisiológico por calor.
<b>PT</b>	platino.
<b>q</b>	flujo de calor.
$q_{\text{ext}}$	flujo de calor exterior.
$q_{\text{int}}$	flujo de calor interior.
<b>r</b>	coeficiente de Pearson.
<b>R</b>	radiación.
<b>RCT</b>	umbral de compensación respiratoria-anaeróbico.
<b>RES</b>	transferencia de calor por la respiración.

<b>RPE</b>	<i>Rating of Perceived Exertion</i> o percepción subjetiva del esfuerzo.
<b>RQ</b>	cociente respiratorio.
<b>S</b>	almacenamiento de calor corporal.
<b>s</b>	segundo.
<b>SCBA</b>	<i>Self Contained Breathing Apparatus</i> o equipo de respiración autónomo.
<b>T<sub>a</sub></b>	temperatura ambiental.
<b>T<sub>cuerpo</sub></b>	temperatura corporal promedio.
<b>T<sub>cadera</sub></b>	temperatura de la cadera.
<b>TDU</b>	unidades de dosis de radiación térmica.
<b>T<sub>gastro</sub></b>	temperatura gastrointestinal.
<b>T<sub>int</sub></b>	temperatura interior.
<b>T<sub>muslo</sub></b>	temperatura del muslo.
<b>TP</b>	traje de protección.
<b>T<sub>pecho</sub></b>	temperatura del pecho.
<b>T<sub>piel</sub></b>	temperatura de la piel.
<b>TRIMP</b>	carga de trabajo.
<b>UE</b>	Unión Europea.
<b>UNE</b>	Una Norma Española.
<b>V</b>	velocidad del tapiz.
<b>VE</b>	ventilación.
<b>VO<sub>2</sub></b>	consumo de oxígeno.
<b>VO<sub>2max</sub></b>	consumo máximo de oxígeno.
<b>vs</b>	<i>versus</i> , contra, frente a.
<b>VT1</b>	umbral aeróbico.
<b>VT2</b>	umbral anaeróbico.

<b>W</b>	trabajo mecánico efectivo.
<b>W</b>	vatio.
<b>W·m<sup>-2</sup></b>	vatio por metro cuadrado.
<b>Y</b>	variable probit.
<b>Z1</b>	zona de intensidad ligera, por debajo del VT.
<b>Z2</b>	zona de intensidad moderada, entre VT y RCT.
<b>Z3</b>	zona de alta intensidad, por encima de RCT.

## ÍNDICE GENERAL

	<i>Pág.</i>
1. ANTECEDENTES.....	26
1.1. LOS INCENDIOS FORESTALES. CONTEXTUALIZACIÓN.....	27
1.2. LA EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES.....	29
1.2.1. El personal especialista en extinción de incendios forestales (PEEIF).....	29
1.2.2. La extinción.....	30
1.2.2.1 Fases.....	30
1.2.2.2. Métodos.....	32
1.3. FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO, LA SEGURIDAD Y LA SALUD DEL PEEIF.....	33
1.3.1. Fatiga e intensidad de esfuerzo.....	35
1.3.2. Condiciones ambientales y deshidratación.....	39
1.3.3. Estrés psicológico.....	42
1.3.4. Inhalación de humo.....	43
1.4. ESTRÉS TÉRMICO EN EL PEEIF.....	45
1.4.1. Respuesta termorregulatoria. Balance térmico.....	46
1.4.2. Condiciones ambientales.....	48
1.4.3. Carga de trabajo.....	51
1.4.4. Papel del Equipo de Protección Individual (EPI).....	53
1.4.5. Respuesta fisiológica. Interrelación de factores.....	57
2. OBJETIVOS.....	63
3. ESTUDIO 1. IMPACTO DE DIFERENTES TRAJES DE PROTECCIÓN EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF.....	69
3.1. INTRODUCCIÓN.....	71
3.2. METODOLOGÍA.....	73
3.2.1. Sujetos.....	73
3.2.2. Diseño experimental.....	74
3.2.3. Protocolo experimental.....	75
3.2.4. Mediciones y cálculos.....	76
3.2.5. Análisis estadístico.....	80
3.3. RESULTADOS.....	81
3.4. DISCUSIÓN.....	86

4. ESTUDIO 2. REPERCUSIÓN DEL TRAJE DE PROTECCIÓN EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF A INTENSIDADES MODERADAS-ALTAS DE TRABAJO.....	91
4.1. INTRODUCCIÓN.....	93
4.2. METODOLOGÍA.....	95
4.2.1. Sujetos.....	95
4.2.2. Diseño experimental.....	96
4.2.3. Protocolo experimental.....	97
4.2.4. Mediciones y cálculos.....	98
4.2.5. Análisis estadístico.....	101
4.3. RESULTADOS.....	102
4.4. DISCUSIÓN.....	108
5. ESTUDIO 3. INFLUENCIA DEL EPI EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF A INTENSIDADES MODERADAS-ALTAS DE TRABAJO.....	117
5.1. INTRODUCCIÓN.....	119
5.2. METODOLOGÍA.....	121
5.2.1. Sujetos.....	121
5.2.2. Diseño experimental.....	122
5.2.3. Protocolo experimental.....	123
5.2.4. Mediciones y cálculos.....	124
5.2.5. Análisis estadístico.....	126
5.3. RESULTADOS.....	127
5.4. DISCUSIÓN.....	134
6. ESTUDIO 4. CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE TÉRMICO DURANTE LA EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES.....	143
6.1. INTRODUCCIÓN.....	145
6.2. METODOLOGÍA.....	149
6.2.1. Sujetos.....	149
6.2.2. Diseño experimental.....	150
6.2.3. Análisis de los incendios.....	150
6.2.4. Análisis estadístico.....	156
6.3. RESULTADOS.....	157
6.4. DISCUSIÓN.....	167
7. CONCLUSIONES.....	175
8. BIBLIOGRAFÍA.....	181

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1.1. Miembros de una Brigada de Refuerzo en Incendios Forestales realizando ataque directo con azada (izquierda) y batefuegos (derecha)......	32
Figura 1.2. Miembros de una Brigada de Refuerzo en Incendios Forestales realizando ataque indirecto con herramientas manuales. ....	33
Figura 1.3. Factores que condicionan el rendimiento, la seguridad y la salud del PEEIF (Eglin, 2007). ....	34
Figura 3.1. Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardíaca y concentración de lactato para los diferentes trajes de protección (TP) analizados y la configuración en ropa de deporte. ....	82
Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura gastrointestinal, temperatura del microambiente e índice de estrés fisiológico (PSI) para los diferentes TP analizados en este estudio y la configuración en ropa de deporte. ....	83
Figura 3.3. Comportamiento de la percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) para los diferentes TP analizados en este estudio. ....	84
Figura 3.4. Comportamiento de la humedad relativa registrada durante las pruebas en los diferentes trajes de protección (TP). ....	85
Figura 4.1. Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardíaca y concentración de lactato con el traje de protección (TP) y ropa de deporte. ....	102
Figura 4.2. Relación entre frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno en la prueba en traje de protección (TP) (línea sólida) y en ropa de deporte (línea discontinua). ....	103

Figura 4.3.	Comportamiento de la temperatura gastrointestinal y de la temperatura media de la piel en el traje de protección (TP) y ropa de deporte.....	104
Figura 4.4.	Comportamiento de PSI en el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media $\pm$ SD.....	105
Figura 4.5.	Comportamiento de la RPE, la sensación térmica y la sensación de humedad en el traje de protección (TP) y en ropa de deporte.....	106
Figura 4.6.	Sudoración total, sudor retenido en la ropa y tasa de sudoración (excluidas las zapatillas) con el traje de protección (TP) o ropa de deporte.....	107
Figura 4.7.	Evaporación y eficiencia de la evaporación con el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media $\pm$ SD. *: diferencias significativas ( $p < 0.05$ )....	108
Figura 5.1.	Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardíaca y concentración de lactato con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte.....	128
Figura 5.2.	Relación entre frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno en la prueba portando el equipo de protección individual (EPI) (línea sólida) y en ropa de deporte (línea discontinua).....	129
Figura 5.3.	Comportamiento de la temperatura gastrointestinal y de la temperatura media de la piel con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte.....	130
Figura 5.4.	Comportamiento de PSI con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte.....	131
Figura 5.5.	Comportamiento de la RPE y la sensación térmica en el equipo de protección individual (EPI) y en la ropa de deporte.....	132

Figura 5.6.	Sudoración total, sudor retenido en la ropa y tasa de sudoración en el equipo de protección individual (EPI) y en ropa de deporte.....	133
Figura 5.7.	Evaporación y eficiencia de la evaporación con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte.....	133
Figura 6.1.	Izquierda vista general de los sensores exteriores. Derecha colocación de los sensores interiores y de los registradores de datos.....	153
Figura 6.2.	Derecha detalle del sensor de flujo de calor y sonda de temperatura exteriores en la zona del pecho. Izquierda detalle del sensor de flujo de calor del muslo.....	153
Figura 6.3.	Comportamiento del flujo de calor y la temperatura ambiental registrados en la zona del pecho exterior durante un incendio de exposición intensa (Lena, Asturias, 21/08/2015).....	167



## ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1.1. Referencias de flujo de calor.....	50
Tabla 3.1. Características de los participantes (n=8).....	74
Tabla 3.2. Características de los trajes analizados.....	75
Tabla 3.3. Parámetros de sudoración (media $\pm$ SD).....	85
Tabla 3.4. Parámetros del balance térmico (media $\pm$ SD).....	86
Tabla 4.1. Características de los participantes (n=8).....	96
Tabla 4.2. Parámetros del balance térmico (media $\pm$ SD).....	108
Tabla 5.1. Características de los participantes (n=8). ....	121
Tabla 5.2. Parámetros del balance térmico (media $\pm$ SD).....	134
Tabla 6.1. Valores medios de flujo de calor, tiempo de exposición y factor de atenuación del traje de protección (media $\pm$ SD [rango]).....	158
Tabla 6.2. Valores promedio de flujo de calor, tiempo de exposición dosis de calor recibida y probabilidad de quemaduras de primer grado, para los sensores interiores en función de los umbrales de exposición (media $\pm$ SD [rango]).....	160
Tabla 6.3. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición, durante la realización del ataque directo (media $\pm$ SD [rango]).....	161
Tabla 6.4. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición, durante la realización del contrafuego (media $\pm$ SD [rango]).....	162

Tabla 6.5.	Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición, durante la realización del remate (media $\pm$ SD [rango]). .....	163
Tabla 6.6.	Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición, durante la realización de la vigilancia (media $\pm$ SD [rango]). .....	164
Tabla 6.7.	Valores de temperatura en el ambiente de trabajo, según el tipo de tarea realizada (media $\pm$ SD [rango]). .....	165



**I. ANTECEDENTES**



## **1.1. LOS INCENDIOS FORESTALES. CONTEXTUALIZACIÓN**

Se define como incendio forestal al fuego que se extiende sin control sobre el terreno forestal afectando a una vegetación que no estaba destinada a arder (Vélez, 2000). El fuego es la manifestación visible de la reacción fisicoquímica de la combustión. Para que un fuego comience o se mantenga, es condición indispensable que concurren en la proporción apropiada los tres elementos que forman el triángulo del fuego: combustible, oxígeno y fuente de ignición (Aguirre, 2006).

Además de ser un factor natural, que ha condicionado la existencia y distribución de los bosques en el transcurso de miles de años, el fuego se ha considerado tradicionalmente como una herramienta que el hombre ha utilizado para numerosas labores agrícolas, ganaderas o forestales. La pérdida de población rural y el consecuente abandono de los aprovechamientos tradicionales del monte, ha tenido como consecuencia un notable incremento de la carga de biomasa acumulada (Aguirre et al., 2008). Esto unido al cambio climático y al

calentamiento global, ha provocado el aumento de la magnitud, frecuencia e intensidad de los incendios forestales (Bowman et al., 2017).

La tendencia de los incendios forestales en Europa muestra una alta concentración del número de incendios y sobre todo, de efectos de los mismos, en las regiones mediterráneas, las cuales engloban el 80% de la superficie total quemada en Europa. En el año 2015 la Comisión Europea, a través del Centro Europeo de Información Forestal (EFFIS), cuantificó en 227000 ha la superficie afectada por incendios forestales en los países mediterráneos de la UE, de las cuales 100000 ha pertenecían a España, frente a las 64000, 41000, 11000 y 8000 ha de Portugal, Italia, Francia y Grecia, respectivamente.

Para España, estos datos representan una disminución de la superficie quemada respecto a la registrada en el decenio 1996-2005, sin embargo, el fenómeno de los grandes incendios (*i.e.*, >500 ha) ha manteniendo una tendencia constante durante los últimos 10 años, con un promedio de 30 grandes incendios forestales al año (MARM, 2012).

El aumento de la gravedad de los incendios forestales conlleva el incremento de sus consecuencias: pérdidas de vidas humanas tanto del personal de extinción como de ciudadanos ajenos al dispositivo, hecho que ha experimentado un aumento significativo en Europa en los últimos años (Joint Research Centre, 2015); pérdidas ambientales y elevadas pérdidas económicas, al menos 3.180 millones de euros para el decenio 1996-2006 (MARM, 2006). Según las estadísticas oficiales, en el decenio 2001-2010 se produjeron en España 80 muertes como consecuencia directa de los incendios forestales, de las

que 51 se produjeron entre el personal de extinción (pilotos de aeronaves, maquinistas, brigadistas o bomberos) (MAPAMA, 2012).

## **1.2. LA EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**

### *1.2.1. El personal especialista en extinción de incendios forestales (PEEIF)*

Se entiende por personal de extinción de incendios forestales a todas aquellas personas que se encuentran dentro del dispositivo nacional de lucha contra incendios y realizan directamente trabajos de extinción o bien realizan tareas de apoyo a diversos medios mecánicos (aviones, helicópteros, bulldozers, etc) (Porrero y Peñas, 2000).

El personal especialista en extinción de incendios forestales (PEEIF) es un subgrupo dentro del personal de extinción. Sus características principales son la rápida capacidad de respuesta, gracias a sus desplazamientos en helicóptero y su capacitación para trabajar en las zonas más complejas del incendio (MAPAMA, 2016). Son considerados los equipos de élite de las brigadas de extinción de incendios forestales, ya que sus miembros son especialistas en las distintas técnicas de extinción, especialmente en el manejo del contrafuego (Porrero y Peñas, 2000). Cuando dependen de las Comunidades Autónomas se les denomina Cuadrillas de Acción Rápida (CAR) y ofrecen cobertura en un radio de acción de 50km, dentro de la Comunidad. Las dependientes del MAPAMA, se denominan Brigadas de Refuerzo en Incendios Forestales (BRIF). Se localizan en zonas estratégicas del territorio y tienen cobertura nacional.

### *1.2.2. La extinción*

La extinción de los incendios consiste en lograr que cese el fuego mediante la actuación sobre los componentes del triángulo del fuego: combustible, oxígeno y calor. Para ello se emplean diferentes métodos de extinción que precisan de las herramientas adecuadas, algunas de ellas específicas del sector. El personal de extinción realiza una serie de tareas, que son siempre las mismas, pero pasando de unas a otras en función de las necesidades de cada momento, según el comportamiento del incendio y las tácticas de extinción empleadas (Aguirre, 2006).

#### *1.2.2.1. Fases de la extinción*

- **Reconocimiento y evaluación:** Esta fase se inicia con la llegada al incendio de la brigada. Comprende un proceso de análisis de las características del fuego y de las condiciones meteorológicas y orográficas, previas al ataque para poder definir el plan que engloba la estrategia de extinción, el conjunto de tareas a desarrollar para conseguir los objetivos (tácticas de extinción) y la asignación de recursos personales y materiales para cada tarea. Esta fase de trabajo es desarrollada por el técnico BRIF con el apoyo de los dos capataces.
- **Ataque:** En esta fase se pone en práctica la estrategia de extinción planificada en la fase anterior. Normalmente el objetivo principal es detener el avance de la cabeza de incendio, atacándolo directamente si las condiciones lo propician, o bien mediante al ataque a los flancos.

Puede durar desde tan sólo unos minutos hasta horas o días, según sea el comportamiento del incendio, pudiendo requerir más medios personales, como maquinaria pesada y la presencia de medios aéreos, dentro de lo que se denomina ataque ampliado.

- **Control:** Esta etapa se consigue cuando el perímetro del incendio queda circunscrito dentro de un franja libre de combustible denominada línea de control que perimetra la totalidad del incendio, de tal manera que el fuego no pueda seguir avanzando y se extinga. Se llevan a cabo con medios terrestres, tanto cuadrillas (peones y capataces), como maquinaria pesada.
- **Liquidación o Remate:** Esta fase comienza una vez se tiene el incendio controlado. Implica un conjunto de operaciones destinadas a extinguir completamente el incendio una vez este ha quedado confinado dentro de la línea de control. Se debe iniciar inmediatamente después de haber controlado (a veces esta fase y la anterior se solapan) el avance del incendio, dando prioridad a las áreas donde es más probable que el fuego pueda escapar y que ya estén controladas, por ejemplo atacando puntos calientes dentro del perímetro controlado.
- **Vigilancia:** Consiste en realizar la vigilancia sobre la zona apagada guardando que no queden rescoldos o puntos calientes que puedan reavivar las llamas. Esta fase puede durar desde varios minutos a días, según la intensidad que haya tenido el fuego, su extensión y el tipo de combustible afectado.

### 1.2.2.2. Métodos

#### ***El Método de Ataque Directo***

Se caracteriza por la realización de tareas de extinción muy próximas a las llamas cuando el fuego es incipiente y desprende poco calor y humo. Se emplean, en este método herramientas de sofocación específicas como el batefuegos o lanzando tierra con la pala u otra herramienta. Si la disponibilidad lo permite, lo más efectivo en este método es enfriar directamente la llama mediante agua, para lo que es necesario realizar tendidos de manguera desde motobombas o emplear la mochila extintora.



Figura 1.1. Miembros de una Brigada de Refuerzo en Incendios Forestales realizando ataque directo con azada (izquierda) y batefuegos (derecha).

#### ***El Método de Ataque Indirecto***

Se emplea cuando existe riesgo excesivo para el personal de extinción, bien porque la propagación del fuego sea rápida, exista peligro de focos secundarios, la topografía sea abrupta, la vegetación densa y el calor o el humo desprendido por el fuego impiden el trabajo próximo a las llamas. Este método consiste en aislar las llamas del combustible mediante la creación de líneas libres de vegetación llamadas líneas de defensa, que se realizan mediante el desbroce y

descauje de la vegetación hasta llegar al suelo mineral o quemando el combustible vegetal, de forma que el incendio al llegar a esa faja libre de vegetación se detenga por falta de combustible.

El contrafuego es una tarea que se realiza dentro del ataque indirecto. Consiste en la aplicación de un fuego controlado y dirigido apoyado sobre una línea de defensa previa, encaminado a eliminar el combustible en la zona del avance del fuego, de modo que se detenga su avance. Se trata de una tarea muy especializada que se suele realizar por el PEEIF (*i.e.*, CAR, BRIF), ya que requiere conocimientos sólidos del manejo y comportamiento del fuego (Aguirre, 2006).



Figura 1.2. Miembros de una Brigada de Refuerzo en Incendios Forestales realizando ataque indirecto con herramientas manuales.

### **1.3. FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO, SEGURIDAD Y SALUD DEL PEEIF**

La extinción de incendios forestales conlleva condiciones específicas de los trabajos de control de emergencias, ya que implica necesariamente la exposición directa al fenómeno causante del riesgo, el fuego, cuyo

comportamiento además no puede ser previsto de modo completo (CNSST, 2009). Esto significa que el PEEIF se enfrenta durante la realización de su trabajo a una serie de factores adversos específicos (*Figura 1.3*) que influyen directamente en su rendimiento y que suponen un aumento de los riesgos laborales (Aisbett y Nichols, 2007). A la realización de un trabajo físico demandante (*i.e.*, apertura de líneas de defensa, tendido mangueras, etc) (Ruby et al., 2002; Gaskill, 2003; Phillips et al., 2012) y de larga duración (Rodríguez-Marroyo et al., 2012), en condiciones ambientales que combinan altas temperaturas (Budd, 1997; Rossi, 2003) e inhalación de humos (Austin 2008), se suma la dificultad de rehidratación y avituallamiento (Montain et al., 2008; Raines et al., 2013) o la exposición a estrés psicológico (Guidotti, 1995).

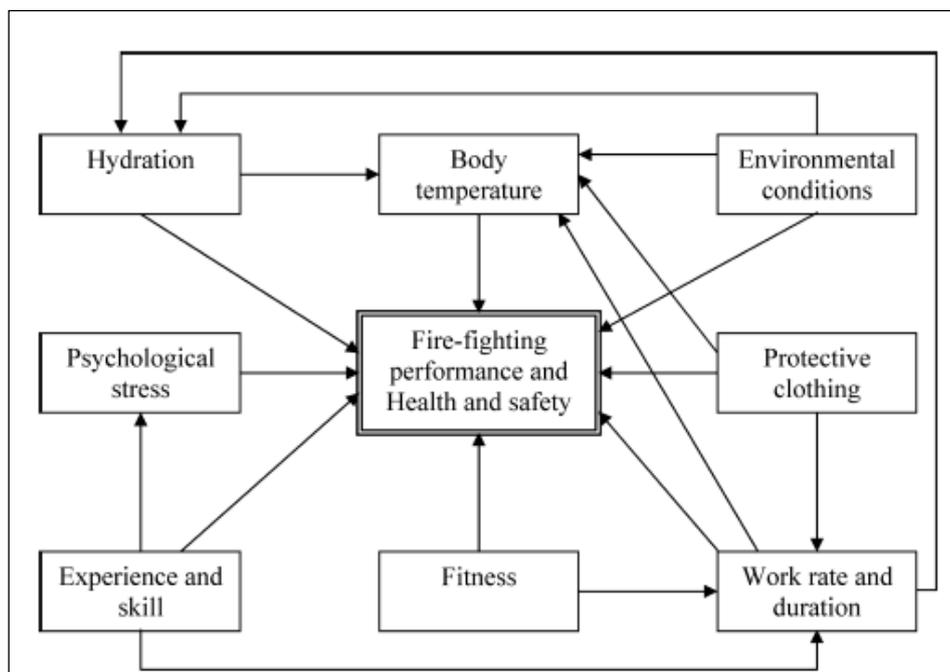


Figura 1.3. Factores que condicionan el rendimiento, la seguridad y la salud del PEEIF (Eglin, 2007).

De los escasos datos disponibles acerca de la siniestralidad del PEEIF, se desprende que de todas las actividades realizadas (*i.e.*, preparación física,

trabajos de mantenimiento de base, entrenamiento en tareas de extinción, extinción de incendios) la extinción de incendios supone la mayor tasa de peligrosidad (MARM, 2010). El conjunto de factores asociados a la extinción se materializa en la aparición de un número de accidentes mayor que para el resto de actividades, ya que un 42% de las lesiones con baja laboral ocurren durante la extinción.

### *1.3.1. Fatiga e intensidad de esfuerzo*

La fatiga puede ser definida como una reducción de la capacidad de trabajo, resultante de sobrecarga física o mental a la que se ve sometido el organismo y que es reversible con el descanso. En el bombero forestal se manifiesta mediante dolor muscular y articular, disminución en la capacidad de trabajo, somnolencia o dificultad para concentrarse (Sharkey, 1999). Por lo tanto la fatiga provoca la disminución de la capacidad de trabajo, la aparición de conductas de riesgo, y la ocurrencia de un mayor número de accidentes (Ruby et al., 2002).

En el ámbito del trabajo físico y de la ergonomía, los parámetros que se utilizan para monitorizar la intensidad de trabajo son la frecuencia cardiaca (FC) y el consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) (ACSM, 1998). La monitorización de la FC como parámetro indicador de la intensidad de trabajo físico se basa en la relación lineal demostrada entre el  $VO_2$  y la FC hasta altas intensidades (Astrand y Rodahl, 1985). La facilidad para monitorizar la frecuencia cardiaca respecto al consumo de oxígeno, ha permitido que se utilice con asiduidad como un parámetro sencillo y válido para cuantificar la intensidad del trabajo físico

(Foster et al., 2001) en ocupaciones laborales (Apud et al., 2002; Boss et al., 2004).

Los principales estudios de la literatura que han analizado la carga de trabajo que supone la extinción de incendios tanto de estructura como forestales, se han realizado en pruebas experimentales o simulaciones con fuego. La carga de trabajo soportada por los bomberos de estructura durante las diferentes tareas específicas, implican frecuencias cardíacas de 140-190 ppm, con valores máximos de  $\text{VO}_2$  de  $3.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $16\text{-}44 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) que pueden llegar a representar el 72% de la frecuencia cardíaca de reserva, obtenidos en pruebas de duración muy variable (0.5-95 min) (Barnard y Duncan, 1975; Lusa et al., 1993; Bos et al., 2004; von Heimburg et al., 2006; Angerer et al., 2008, Richmond et al., 2008).

Las tareas más demandantes son el rescate de víctimas y actividades que requieren el transporte de sobrepeso subiendo escaleras (equipo de respiración autónoma más el equipo de protección individual, incluyendo cargar con algún tipo de material o herramienta), con valores de  $44 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$  (Lemon y Hermiston, 1974; von Heimburg et al., 2006; Holmer y Gahved, 2007).

En la extinción de incendios forestales Apud et al. (2002) determinaron en bomberos forestales chilenos una FC media de 115 ppm (*i.e.*, 40-50% de la FC de reserva) durante la extinción con herramientas manuales, dato sustancialmente menor al obtenido por Budd et al. (1997a) en quemas experimentales en el suroeste de Australia, mientras se construía línea de defensa, quienes reportaron valores medios de FC de  $152 \pm 14$  ppm con un  $\text{VO}_2$  de  $21.2 \pm$

3.43 mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>. Del mismo modo se han descrito valores de VO<sub>2</sub> de ~30 mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> (*i.e.*, 50-60% del VO<sub>2max</sub>) (Sharkey, 1999), obtenidos en quemas experimentales en EEUU. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Aisbett y Nichols (2007), quienes establecen que el PEEIF se encuentra largos periodos de tiempo a una intensidad moderada (50-60% de la FC máxima teórica) y momentos puntuales al 70-85% de la misma.

En el marco del proyecto de I+D+i CREIF Factores Condicionantes del Rendimiento del Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales, Rodríguez-Marroyo et al. (2012) estudiaron el esfuerzo que supone la extinción de incendios forestales para el personal de la BRIF (Brigadas de refuerzo en Incendios Forestales). A los 200 participantes en el estudio, se les monitorizó la frecuencia cardíaca cuando acudieron a la extinción de 79 incendios forestales. En función del consumo máximo de oxígeno (VO<sub>2max</sub>) medido en laboratorio, se establecieron tres zonas de intensidad de esfuerzo: moderada (por debajo del 50% VO<sub>2max</sub>), alta (entre el 50 y el 75% VO<sub>2max</sub>) y muy alta (por encima del 75% VO<sub>2max</sub>) determinándose el tiempo de permanencia en cada una de estas zonas y la carga de trabajo. Los tiempos de permanencia en la zona de moderada, alta y muy alta intensidad se multiplicaron por 1, 2 o 3, respectivamente, sumándose los valores obtenidos para determinar la carga de trabajo o TRIMP (volumen × intensidad) de los incendios (Foster et al., 2001).

Los resultados obtenidos mostraron una frecuencia cardíaca media de 125 ± 1 ppm con una intensidad de trabajo de ~66% de la FC máxima teórica. El porcentaje de tiempo que pasaron en Z1, Z2 y Z3 fue 66.5 ± 1.2, 26.4 ± 0.9 y 6.4 ± 0.5%, respectivamente. La FC media fue significativamente mayor en los

incendios forestales de duración 1 h ( $133 \pm 2$  ppm) y 1-3 h ( $128 \pm 1$  ppm) frente a 3-5 h ( $120 \pm 3$  ppm) y 5 h ( $116 \pm 32$  ppm). Estos resultados muestran la importancia del trabajo realizado en la zona de intensidad moderada (*i.e.*, por debajo del 50% del  $VO_{2max}$ ). A medida que la duración del incendio es mayor, los porcentajes y tiempos de trabajo en la zona de moderada intensidad son también mayores. Sin embargo, se observó una tendencia a la disminución del porcentaje de trabajo en la zona de alta intensidad a medida que la duración del incendio fue mayor obteniéndose únicamente diferencias significativas entre el porcentaje de trabajo en esta zona en los incendios de 5-10 h y el resto de incendios analizados.

La alta intensidad de esfuerzo a la que tienen que hacer frente los bomberos forestales, posiblemente se condicione por el gran volumen de trabajo realizado y no tanto por la intensidad que éste implica (Sharkey y Davis, 2008; Marroyo et al. 2012). En este sentido, la duración media de los incendios analizados fue de ~225 min, duración similar a muchas de las etapas que realizan los ciclistas en una gran vuelta ciclista como la Vuelta Ciclista a España o el Tour de France (Foster y cols., 2001; Lucía y cols., 2003). El TRIMP promedio registrado en este estudio (~260) fue similar al reportado para maratones (~300) y ligeramente por debajo de los observados en ciclistas profesionales en (~330) (Lucía et al., 2003; Rodríguez -Marroyo et al., 2009).

Otros estudios, mediante el uso del agua doblemente marcada, han analizado el gasto energético que supone la extinción de incendios forestales (Ruby y cols., 2002; Cuddy et al., 2015). Estos estudios reportaron costes energéticos en las labores de extinción de incendios de  $2628 \pm 714$  kcal·d<sup>-1</sup>,

llegando a alcanzarse puntualmente las  $12 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}$ . Este mismo grupo de investigación ha obtenido mediante el empleo de acelerómetros triaxiales, costes energéticos de  $\sim 3000 \text{ kcal}\cdot\text{d}^{-1}$  durante la realización de trabajos en la extinción de incendios forestales (Cuddy et al., 2015). En el ámbito laboral se considera que trabajos que superan las  $6 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}$  implican una intensidad moderada y aquellos que superan las  $8 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}$  implican una alta intensidad (Apud y cols., 2002), considerándose el trabajo físico con valores por encima de  $12 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}$  como muy intensos pudiendo mantenerse en periodos cortos de tiempo (Wu y Wang, 2002). Estos datos ponen de relieve que la extinción de incendios es una ocupación laboral altamente demandante que requiere una buena capacidad física de los individuos implicados (Barr et al., 2010).

### *1.3.2. Condiciones ambientales y deshidratación*

Cuando se realiza trabajo físico la temperatura central comienza a elevarse de tal modo que incrementos de tan solo  $0.2\text{-}0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  activan el mecanismo de la vasodilatación periférica y la sudoración se inicia, como vía de eliminación del calor (Gagge y Gonzalez, 1996). Cuando las condiciones ambientales (*i.e.*, temperatura, humedad) no permiten alcanzar el equilibrio entre las ganancias y pérdidas de calor, el aumento de la temperatura central es constante de modo que se incrementa en flujo sanguíneo hacia la piel y la producción de sudor para evitar el aumento excesivo de la temperatura corporal (Kenny et al., 2010). Por ello un mismo esfuerzo en condiciones ambientales de  $35^\circ\text{C}$  incrementa un 11% la frecuencia cardiaca respecto al realizado a  $22^\circ\text{C}$  (Lafrenz et al., 2008), o se incrementa 37 pulsaciones por minuto cuando la

temperatura ambiental aumenta de 14 a 90°C en tan sólo 16 minutos de duración (Smith et al., 1997). Esto implica una competición por el gasto cardiaco disponible, que produce el descenso progresivo del volumen sistólico, la presión arterial y el incremento de la frecuencia cardiaca (Rowell et al., 1966; Ekelund, 1967). Ambas demandas pueden incapacitar al sistema cardiovascular para afrontarlas (Rowell, 1974) provocando el incremento la temperatura corporal y limitando la capacidad de trabajo (Sawka et al., 1999; González-Alonso et al.; 1999). Todo ello pone de relieve la importancia del calor sobre la respuesta cardiovascular y el comportamiento de la temperatura corporal.

En este sentido, las tasas de sudoración descritas durante la simulación de incendios de estructura, oscilaron entre 0.5 y 2 L·h<sup>-1</sup> para tareas con duraciones de entre 12 y 60 min (Rossi, 2003 Griefahn et al., 2003; Eglin y Tipton, 2005, Richmond et al., 2008), lo cual supuso un déficit hídrico menor al 1% del peso corporal (Eglin, 2007). Horn et al., (2012) por el contrario analizaron tasas de sudoración de  $2.2 \pm 0.9$  L (*i.e.*, 2.5% del peso corporal) en pruebas de larga duración (3h) en ambiente templado (14 °C). En bomberos forestales, Hendrie et al., (1997) describieron una tasa media de sudoración de  $1.14 \pm 0.37$  L·h<sup>-1</sup>, durante la extinción de incendios en quemas experimentales, con una duración de la exposición de 117 min. Apud et al (2002) en pruebas de simulación de extinción durante el uso de herramienta manual en condiciones de calor sin presencia de fuego, describieron una tasa de sudoración de 1.7 L·h<sup>-1</sup> (rango 1-3 L·h<sup>-1</sup>) valores en ambos casos que concuerdan con los valores aportados por la literatura en bomberos de estructura, si bien en exposiciones generalmente de mayor duración.

La realización de ejercicio físico en condiciones cálidas o húmedas sin la adecuada reposición de fluidos, conduce a la deshidratación. Diversos estudios han establecido que pérdidas de peso corporal entorno al 4% durante la realización de ejercicio en calor provoca la disminución general del volumen sanguíneo, incluyendo la reducción del flujo sanguíneo a los músculos y la piel así como la reducción de la tasa de sudoración (Mountain y Coyle, 1992; González-Alonso et al., 1999). Como consecuencia se produce el incremento de la temperatura central y un mayor esfuerzo sobre el sistema cardiovascular (Sawka et al., 2015).

Del mismo modo, se ha establecido que un nivel de deshidratación menor (*i.e.*, 1-2% del peso corporal) resulta suficiente para provocar el incremento de la temperatura corporal y de la carga del sistema cardiovascular (Sawka et al., 1985; Mountain y Coyle, 1992; Maughan et al., 2007). Por lo tanto durante la realización de trabajo intenso en calor, la deshidratación y la hipertermia pueden conducir a una fatiga temprana (González-Alonso et al., 1999) limitando la capacidad de trabajo físico y el tiempo de tolerancia a esas condiciones (Cheung et al., 2010).

Una adecuada reposición de fluidos antes, durante y después de la exposición al calor resulta fundamental para evitar la pérdida de rendimiento físico y mental (Racinais et al., 2015) ya que mantiene la tasa de sudoración y el flujo sanguíneo periférico, conservando por lo tanto la capacidad de eliminar calor y reduciendo el esfuerzo realizado por el sistema cardiovascular (Mountain y Coyle, 1992) al incrementar el volumen sistólico y disminuir la frecuencia cardiaca (González-Alonso et al., 1999).

### *1.3.3. Estrés psicológico*

La extinción de incendios forestales conlleva para el PEEIF el acúmulo tanto de tensión fisiológica como psicológica (Guidotti, 1995; Sharkey, 1999). Esta última puede venir provocada por la amenaza constante que supone la extinción de incendios forestales tanto para la seguridad personal como para la seguridad del grupo, la ansiedad que provoca el desarrollo de trabajos en un ambiente hostil, la naturaleza imprevisible de lo que va a ocurrir, etc. Todos estos aspectos que desencadenan un aumento de su FC como respuesta a estas situaciones estresantes que se añaden a la carga fisiológica que imponen la intensidad del trabajo físico y las condiciones ambientales (Barnard y Duncan, 1975; Budd et al., 1997b; Eglin, 2007).

Diversos estudios realizados con bomberos de estructura, han analizado el estrés psicológico utilizando un cuestionario de valoración de la ansiedad acumulada (Smith et al., 2001). Los resultados muestran un aumento significativo de la ansiedad en los bomberos tras el desarrollo de su trabajo, lo cual puede afectar directamente en los mecanismos de toma de decisión (Kivimaki y Lusa, 1994).

Por otro lado, el aumento de las catecolaminas como determinante de tensión psicológica en bomberos de estructura, también ha sido estudiado, hallando un aumento significativo de las mismas tras la realización de trabajos en un ambiente cálido (Kalimo et al., 1980; Aisbett y Nichols, 2007). Otros estudios han analizado el efecto del incremento de la temperatura corporal en el comportamiento cognoscitivo determinando que un incremento de 1.3 °C deteriora tanto las habilidades mentales como cognoscitivas (Hancock, 1982).

#### 1.3.4. Inhalación de humo

La combustión de materia orgánica genera humo, el cual está compuesto por una mezcla compleja de sustancias tóxicas que pueden ser inhaladas por el personal de extinción (Reisen et al., 2008). Los principales contaminantes liberados por la combustión son el monóxido de carbono (CO), los irritantes respiratorios (*i.e.*, formaldehído, acroleína), compuestos orgánicos volátiles (*i.e.*, benceno) y otra serie de compuestos altamente tóxicos como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), además de las partículas respirables (Naeher et al., 2007).

Varios estudios a nivel internacional han analizado la exposición que el personal de extinción experimenta a la mezcla de gases y partículas presentes en el humo, tanto en incendios forestales (Reindhart et al., 2004) como en quemas prescritas (Materna et al., 1992; McCammon y McKenzie, 2000;). Todos ellos describen al CO como el principal tóxico de interés durante la extinción de incendios forestales, sobre todo en exposiciones de alta concentración y corta duración, ya que su inhalación conlleva una serie de síntomas (*i.e.*, mareos, náuseas, dolor de cabeza, irritación ocular y de las vías respiratorias, incremento de la frecuencia cardiaca y respiratoria, falta de concentración y disminución de las facultades cognitivas) que afectan tanto a la capacidad de los sujetos para realizar trabajo físico (Austin, 2001; Scarino et al., 2005) como a la toma de decisiones (Reisen et al., 2011).

Los estudios sobre la exposición a CO son muy limitados y relativamente recientes a tenor de los progresos en la tecnología de toma de muestras “in situ”. Es por esto que las investigaciones se limitan a estudios de exposición personal

de los bomberos forestales. Se han obtenido concentraciones de monóxido de carbono promediadas para un turno de trabajo de  $80 \text{ ppm}^{-1}$  (Materna et al., 1992) y de  $58 \text{ ppm}^{-1}$  para quemas prescritas (Reindhart y Ottmar, 2000),  $38.8 \text{ ppm}^{-1}$  en ataque ampliado,  $28.2 \text{ ppm}^{-1}$  en ataque directo (Reindhart y Ottmar, 2000) y  $7.4 \text{ ppm}^{-1}$  en estudios llevados a cabo en Australia (Reisen et al., 2011). Sin embargo y debido a la naturaleza altamente intermitente de la exposición al humo (Austin, 2008) estos valores promediados en una jornada de trabajo pueden enmascarar picos peligrosos, de ahí la necesidad de medir la exposición en períodos cortos (Carballo et al., 2010). Así, McCammon y McKenzie (2000) obtuvieron medias de los picos de exposición de  $88 \text{ ppm}^{-1}$  para 15 minutos, alcanzando el pico máximo  $146 \text{ ppm}^{-1}$ ; mientras que Reinhardt y Ottmar (2004), obtuvieron un valor medio de  $54 \text{ ppm}^{-1}$  de modo similar a los resultados obtenidos en Australia de  $46 \text{ ppm}^{-1}$  de media de los picos máximos, con máximos absolutos de 150 y  $179 \text{ ppm}^{-1}$  respectivamente (Reisen et al., 2011).

Carballo et al., (2010) analizaron la exposición al CO durante la extinción de incendios forestales reales. La concentración media de CO en los incendios fue de  $18.4 \pm 1.7 \text{ ppm}^{-1}$ . Las mayores exposiciones al CO se analizaron en el ataque combinado ( $20.4 \pm 2.3 \text{ ppm}^{-1}$ ) seguidas de las obtenidas durante el ataque directo ( $17.5 \pm 2.7 \text{ ppm}^{-1}$ ). Además la exposición más intensa fue cuando el combustible fue matorral ( $19.8 \pm 2.2 \text{ ppm}^{-1}$ ) comparado con bajo arbolado ( $17.2 \pm 3.9 \text{ ppm}^{-1}$ ) y pasto ( $12.0 \pm 5.6 \text{ ppm}^{-1}$ ). Las diferencias en las concentraciones analizadas respecto a los resultados de la literatura, se relacionarían con las diferencias metodológicas, ya que en este estudio se promedió la exposición en función de la duración total de los incendios, mientras

que en la bibliografía se tomaron mediciones en exposiciones puntuales. Los resultados obtenidos resaltan el hecho de que el máximo de producción CO se produce cuando se apagan las llamas, momento que coincide con las labores de control y remate (Alvarado y Pascual, 2007) además los incendios de matorral generarían una mayor cantidad de CO en línea con lo observado en quemas prescritas en Australia (Reisen et al., 2011).

#### **1.4. EL ESTRÉS TÉRMICO EN EL PEEIF**

En la literatura se han estudiado profesiones físicamente exigentes, incluyendo a los militares (Montain et al., 1994), bomberos de estructuras (Smith et al., 2001, Eglin et al., 2004 , Richmond et al., 2008) y los bomberos forestales (Heil 2002, Ruby et al., 2002; Cuddy et al., 2015; Larsen et al., 2015). Se ha indicado que las altas exigencias físicas de estas profesiones vienen no sólo de la naturaleza de las actividades que llevan a cabo, sino también de las condiciones ambientales en las que se realizan. Tener que realizar un trabajo físico exigente en condiciones ambientales de altas temperaturas, mientras se lleva la ropa de protección, incrementa la temperatura corporal y la carga cardiovascular de los sujetos, pudiendo alcanzar el límite de tolerancia del organismo (Smith et al., 1997).

En este sentido, en la literatura se ha relacionado el estrés térmico con un mayor riesgo de sufrir un fallo cardíaco en bomberos de estructura (Smith et al., 2001; Kales et al., 2007; Karter et al., 2012). El 56% de bomberos fallecidos en EEUU en el 2014 se debieron a fallos cardíacos sobrevenidos durante los

trabajos de extinción o justamente tras finalizarlos (Fahy et al., 2015). En España un informe de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo cifró en un 23% los fallecidos por infartos entre el personal de extinción del operativo nacional (CNSST, 2009). Este alto porcentaje de infartos estaría también relacionado con las deficientes condiciones de salud de los bomberos, que limitan su tolerancia a las duras condiciones de trabajo (Kales et al., 2009).

#### *1.4.1. Respuesta termorregulatoria. Balance térmico*

Los humanos podemos soportar amplias variaciones de la temperatura ambiental, mientras que pequeñas variaciones en la temperatura corporal (*i.e.*, 3 °C) sobre la temperatura corporal media de  $36 \pm 0.3$  °C (Ivy, 1944), pueden conducir a la pérdida del rendimiento físico y mental, daños severos e incluso la muerte (Astrand et al., 2003; Crandall y González-Alonso, 2010). Por ello el organismo despliega una serie de mecanismos termorregulatorios destinados a controlar la temperatura corporal (Kenny et al., 2009). Las vías por las que el organismo gana o pierde calor se definen mediante la ecuación del balance térmico:

$$S = M - W \pm R \pm C - E_{sk} - C_{res} - E_{res}$$

El almacenamiento de calor corporal  $S$ , es igual a la diferencia entre el gasto de energía metabólica (*i.e.*, tasa metabólica,  $M$ ), trabajo externo ( $W$ ), el intercambio de calor seco de la piel por radiación ( $R$ ) y convección ( $C$ ), intercambio de calor convectivo ( $C_{res}$ ) y pérdida de calor por evaporación ( $E_{res}$ ) del tracto respiratorio, y pérdida de calor por evaporación de la piel ( $E_{sk}$ ). Para

mantener el equilibrio térmico ( $S = 0$ ), la tasa de ganancia de calor debe ser equivalente a la tasa de pérdida de calor total (Cramer y Jay, 2016).

Cuando se realiza trabajo físico, aproximadamente el 75% de la energía generada por el músculo se acumula en el organismo en forma de calor (Astrand et al., 2003). Cuanto más intenso o mayor duración tenga una cierta actividad física, mayor será la generación de calor (Smith y Petruzzello, 1998; Smith et al., 2001). La cantidad de evaporación necesaria para mantener el equilibrio térmico ( $E_{req}$ ) está determinada por tanto, por la suma del calor metabólico producido y los intercambios de calor por radiación y convección:  $E_{req} = M \pm R \pm C$  (Belding y Hatch, 1955; Kerslake, 1972). Para lograr un enfriamiento efectivo mediante la producción de sudor, éste debe producirse en suficiente cantidad y el medio ambiente debe permitir su evaporación (Malchaire et al, 2001). En ambientes donde la presión de vapor de agua es elevada (*i.e.*, alta humedad relativa), la evaporación no se produce de modo eficiente, lo que limita la termorregulación (Smith et al., 1997, 2001; Baker et al., 2000; Selkirk y McLellan, 2004).

La realización de trabajo intenso en ambientes cálidos, reduce la transferencia de calor seco (radiación y convección), según disminuye el gradiente entre la temperatura ambiental y la temperatura media de la piel ( $\sim 33$  °C) (Havenith et al., 1999; Chevront et al., 2010). Cuando la temperatura del aire excede la temperatura de la piel o existen fuentes de calor radiante, el balance entre ganancias de calor y eliminación del mismo se invierte pasando el cuerpo a ganar calor por radiación y convección en lugar de perderlo (Holmér, 2006; Brotherhood, 2008; Cramer y Jay, 2016). En estas circunstancias es

necesario un enfriamiento adicional mediante la evaporación del sudor (Brotherhood, 2008), produciéndose un aumento de la sudoración para compensar la ganancia de calor seco (Havenith et al., 1999). Si la evaporación del sudor no se realiza de forma efectiva, se acumula en la piel sin producir enfriamiento, lo cual supone el acúmulo de calor en el organismo y el consiguiente incremento de la temperatura corporal (Smith y Petruzzello, 1998; Baker et al. 2000; Eglin, 2004).

Como consecuencia del aumento de la carga térmica, la respuesta fisiológica se caracteriza por el incremento de la frecuencia cardiaca, la temperatura corporal, la tasa de sudoración, la percepción subjetiva de esfuerzo y la sensación térmica, respecto a la realización del mismo trabajo en condiciones neutras o frescas. Esta respuesta se denomina tensión fisiológica por calor (*i.e.*, *heat strain*) (Bos et al., 2004; Petruzzello et al., 2009) y surge como respuesta del organismo a las condiciones ambientales, la ropa de protección y la carga metabólica, que determinan el estrés térmico (*i.e.*, *heat stress*) (Smith y Petruzzello, 1998; Petruzzello et al., 2009; Cramer y Jay, 2016).

#### *1.4.2. Condiciones ambientales*

El flujo de calor emitido por un incendio, depende de su geometría (*i.e.*, altura de llamas, pendiente del terreno), de la potencia emisiva y temperatura de las llamas (*i.e.*, tipo de combustible) (Butler y Cohen, 1998; Zárate et al, 2008) y de las condiciones meteorológicas como el viento que genera corrientes convectivas que alimentan la combustión (Frankman et al., 2013). Por otro lado el flujo de calor recibido por el personal de extinción depende del contenido de

humedad y de dióxido de carbono ambientales, que reducen la transmisión de calor en la atmósfera (Rossi, 2003; Raj, 2008), de la posición relativa del bombero forestal respecto frente de llamas y de las características de la ropa de protección (Raimundo y Figueiredo, 2009). Los diferentes componentes de la transferencia de calor (*i.e.*, radiación, convección), se combinarán para producir una ganancia o pérdida de calor (Raj, 2008). Normalmente en fuegos reales, esta combinación resulta en una ganancia neta de calor por el cuerpo humano (Budd et al., 1997b; Raimundo y Figueiredo, 2009).

En incendios forestales Budd et al. (1997b) describieron las condiciones ambientales durante la realización de línea de defensa en quemas experimentales en Australia. La temperatura ambiental en promedio fue de 29 °C (19–35 °C), con una temperatura radiante media de 66 °C (33-96 °C) un porcentaje de humedad menor al 20% y una velocidad del viento de 7-72 km·h<sup>-1</sup>. La carga de calor radiante medida a través de un radiómetro colocado en un trípode al lado de los bomberos, arrojó valores que oscilaron entre 0.7 kW·m<sup>-2</sup> (*i.e.*, radiación del sol sin efecto del fuego) y 8.6 kW·m<sup>-2</sup> siendo el valor más frecuente 1.6 kW·m<sup>-2</sup>.

Según el trabajo clásico de Hoschke (1981), confirmado por posteriores investigaciones (Foster y Roberts, 1994; Rossi, 2003), las condiciones rutinarias más comúnmente enfrentadas durante la extinción de incendios de estructura alcanzaron valores en torno a 700-1000 W·m<sup>-2</sup> para flujo de calor con rangos de temperatura en torno a 50 °C. Las condiciones referenciadas como peligrosas se dan a partir de 1 kW·m<sup>-2</sup> y su límite superior se encuentra en torno a 7 kW·m<sup>-2</sup>. Estas exposiciones no son raras durante las tareas de extinción en incendios de

estructura con temperaturas ambientales que se situarían en máximos de 160 °C, mientras que las condiciones extremas o críticas se situarían en valores de flujo de radiación superiores a 10 kW·m<sup>-2</sup>, alcanzando temperaturas ambientales de hasta 235 °C que permitirían una tolerancia a las mismas de tan solo un minuto antes de que el equipo de protección comenzase a sufrir serios daños (Foster y Roberts, 1994).

**Tabla 1.1.** Referencias de flujo de calor.

Flujo de calor (kW·m <sup>-2</sup> ) (cal·s <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> )		Observaciones
0.009	2·10 <sup>-4</sup>	Calor que sale por una ventana en un día de invierno
0.085	2·10 <sup>-3</sup>	Pérdida de calor corporal de una persona en invierno. Se asume piel desnuda en un día con viento y con temperatura exterior de 0 °C.
1.14	2.7·10 <sup>-2</sup>	Flujo de calor recibido del sol en los trópicos en un día sin nubes con el sol en posición cenital.
1.37	3.3·10 <sup>-2</sup>	Constante solar. Flujo de calor promedio anual recibido del sol en la capa exterior de la atmósfera.
2.3	5.510 <sup>-2</sup>	Límite de calor soportable por la piel desnuda durante 90 antes de sufrir quemaduras.
5.0	0.12	Nivel de flujo límite de exposición para lugares públicos afectados por el incendio de una balsa de hidrocarburos.
6.4	0.15	Calor recibido de una bombilla incandescente de 100W a 10 cm de distancia.
12.0	0.29	Ignición de la madera tras varios minutos de exposición.
17.0	0.41	En 90 s resistencia térmica que deben resistir de los toboganes de evacuación en situaciones de emergencia en aviones
37.5	0.90	Muerte instantánea debida a la exposición a este nivel de radiación térmica para exposiciones muy cortas (menos de 3s) sin ropa de protección.

Fuente: Raj, 2008.

#### *1.4.2. Carga de trabajo*

Existe el consenso generalizado de que tanto la extinción de incendios forestales como de incendios de estructura, son ocupaciones que conllevan una alta carga física (Lemon y Hermiston, 1977; Smith et al., 2001; Heil, 2002; Ruby et al., 2003; Boss et al., 2004; Eglin, 2007; Williams-Bell et al., 2009) que implica la generación de una elevada tasa de calor metabólico (Havenith et al., 2002; Raimundo y Figueiredo, 2009) donde el gasto energético depende de la naturaleza de la tarea desarrollada y su duración (Gledhill y Jamnik, 1992; Budd et al., 1997a).

La combinación de trabajo físico intenso y estrés térmico, supone un incremento de la carga cardiovascular, debido a las mayores demandas termorregulatorias (González-Alonso et al., 2008). El sistema cardiovascular debe mantener el flujo sanguíneo que envía a los músculos mientras, al mismo tiempo, debe desviar parte del gasto cardíaco para las funciones termorregulatorias, incrementando el aporte sanguíneo a la piel. Esto supone que los sujetos trabajen a un mayor %VO<sub>2max</sub> y una mayor FC (Ely et al., 2010) lo que redundaría en una disminución del rendimiento, una mayor percepción subjetiva de esfuerzo y un menor tiempo de tolerancia (Ely et al., 2010; Nybo et al., 2014). La interacción entre la magnitud del estrés térmico, la intensidad y duración del ejercicio determinan la magnitud de la carga cardiovascular (Crandall y González-Alonso, 2010).

Varios estudios han analizado el impacto del estrés térmico sobre el rendimiento aeróbico de intensidad submáxima, empleando protocolos hasta el

agotamiento (Bannister y Cotes, 1959; González-Alonso et al., 1999; Galloway y Maugham, 2003), o en función del tiempo de tolerancia (Tatterson et al., 2000; Lorenzo et al., 2011; Périard et al., 2011). Las condiciones control oscilaron entre 12 y 23 °C y las de estrés por calor entre 25 y 40 °C.

Los estudios mostraron una disminución del rendimiento submáximo en condiciones de estrés térmico que alcanzó el ~30% cuando se analizó el tiempo hasta el agotamiento, mientras que los estudios que analizaron el tiempo de tolerancia en condiciones de calor demostraron una disminución media de ~13%.

Smith et al. (1997) analizaron, en situaciones de ambiente térmico diferentes 14 – 90 °C, el comportamiento de la FC obteniendo unos valores medios de 139 y 176 ppm para el ambiente fresco y cálido, respectivamente y una mayor percepción de esfuerzo y sensación térmica. Budd et al. (1997a, 2001) analizaron la FC alcanzada en situaciones experimentales de construcción de línea de defensa, utilizando diferentes herramientas de extinción de incendios, registrando una FC de 152 ppm cuando los sujetos se expusieron al efecto directo del fuego frente a 149 ppm cuando el fuego no estuvo presente.

Larsen et al (2015) compararon la respuesta termofisiológica durante la simulación de extinción de incendios forestales en un ambiente muy cálido ~45 °C frente a condiciones templadas ~18 °C, obteniendo un incremento significativo de la FC en condiciones de calor con una FC media de 166 ppm frente a 148 ppm. Estos resultados ponen de relieve la importancia del estrés térmico en la respuesta cardiovascular y subjetiva al esfuerzo.

#### *1.4.4. Papel del Equipo de Protección Individual (EPI)*

Cualquier tipo de ropa es una barrera entre el cuerpo y su entorno y supone una limitación a la transferencia de calor y humedad (McLellan et al., 2013). Propiedades como el aislamiento térmico y la resistencia evaporativa resultan clave para determinar la interacción de la ropa con el balance térmico (Havenith, 1999). Otros factores como el ajuste, número de capas, superficie cubierta, aberturas etc. resultan también de interés ya que interactúan con los anteriores incrementando o disminuyendo su influencia.

El aislamiento térmico es la capacidad de una capa de ropa de reducir el intercambio de calor por radiación y convección (Holmér, 2006) y depende principalmente, del espesor y número de capas de tejido entre la piel y el ambiente (Goldman, 1990). La resistencia evaporativa es la dificultad ofrecida por la ropa a la transferencia del vapor de agua (Holmér, 2006). En ambientes cálidos esta cualidad es incluso más relevante que el aislamiento térmico, para determinar el comportamiento termorregulatorio de la ropa, dada la importancia que toma la evaporación del sudor en esas circunstancias. Esta cualidad está directamente relacionada con la composición y estructura del tejido (McLellan et al., 2013).

Los factores de riesgo no evitables relacionados con la exposición al fuego y el entorno de trabajo, hacen que el uso del Equipo de Protección Individual (EPI), sea de uso obligatorio para la protección del PEEIF. Este tipo de ropa está especialmente diseñada para frenar la entrada de calor y debe cumplir una serie de normas de fabricación y de comportamiento ante las

diferentes vías de transferencia de calor, recogidas en la norma internacional ISO 15384 (2003) y su versión europea, la UNE-EN 15614 (2007). Ambas normas son de obligado cumplimiento para los fabricantes y garantizan el nivel de protección de los tejidos frente a factores térmicos externos, pero no contemplan el comportamiento termorregulatorio del material.

Para obtener el nivel deseado de protección frente al calor, la ropa debe ser relativamente gruesa y/o tener alta resistencia térmica que limita la transferencia de calor desde el medio ambiente al trabajador (McLellan y Havenith, 2016). El EPI usado en la extinción de incendios forestales tiene un nivel de aislamiento térmico de 1.21 Clo (Raimundo y Figueiredo, 2009), mientras que el EPI utilizado por bomberos de estructuras alcanza los ~3 Clo (Goldman, 1990; Taylor, 2006). Esto significa que la mayor protección se consigue gracias a un mayor número de capas, por lo que resulta más voluminoso y pesado, alcanzando unos 10 kg de peso y un total de 25 kg cuando los bomberos portan el equipo de respiración autónoma (SCBA) (Barr et al., 2010). Esto implica que debido al incremento de peso del conjunto, el EPI aumenta el coste energético del movimiento (Taylor et al., 2012). Además la ropa disminuye la economía del movimiento, lo que aumenta aún más la producción de calor (Teitlebaum y Goldman, 1972; Dorman y Havenith, 2009).

Lo anterior pone de relieve que tanto para bomberos de estructura como los forestales, la protección de los factores externos es conseguida en mayor o menor medida a expensas del equilibrio térmico corporal (Budd, 2001). El intenso trabajo físico desarrollado durante la extinción de incendios tanto forestales (Ruby et al., 2003) como de estructura (Williams-Bell et al., 2009),

provoca la producción de una elevada cantidad de calor metabólico (Havenith, 2002; Holmer y Gavhed, 2007) que debe ser eliminado para mantener el equilibrio térmico. Por otro lado, la protección contra el calor proporcionada por un mayor aislamiento de las prendas de protección, puede tener el efecto secundario de reducir la eliminación efectiva de calor hacia el medio (Holmer, 2006) al limitar la evaporación del sudor y frenar el intercambio de calor por radiación y convección (Havenith, 1999).

La mayor dificultad para eliminar el calor, produce un mayor incremento de la temperatura central y la frecuencia cardíaca, produciéndose un aumento de la sudoración que no llega a evaporarse en un intento de aumentar la eficiencia evaporativa (Havenith et al., 1999). La reducción de la eficiencia evaporativa incluso en condiciones de trabajo físico ligero o temperaturas ambientales templadas, conduce a una ganancia constante de calor corporal que no puede ser mantenida en el tiempo, limitando el tiempo de tolerancia al trabajo (*i.e.*, estrés térmico incompensable) (Cheung et al., 2000; McLellan y Selkirk, 2004).

Apud et al. (2002) reportaron que el 40% del sudor producido queda retenido en la ropa. Por ello el contenido de humedad en el interior del traje de protección alcanza entre el 80 y el 100% de humedad relativa (Lawson et al., 2004; Bröde et al., 2008). En este contexto, la evaporación del sudor si el ambiente lo permite, se produce sobre la ropa y no sobre la piel, limitando aún más la pérdida de calor (Nunneley, 1989; McLellan et al., 1996). La reducción de la eficiencia evaporativa conduce a una ganancia constante de calor corporal que no puede ser mantenida en el tiempo, limitando el tiempo de tolerancia al trabajo (Cheung et al., 2000; McLellan y Selkirk, 2004). Lo ideal

por lo tanto, sería llevar ropa de protección que protegiese del ambiente exterior adverso pero que a su vez permitiese una buena eliminación del calor corporal generado (Budd et al., 1997c; Baker et al., 2000; Eglin, 2007).

El estrés térmico asociado al uso de la ropa de protección ha sido documentado bajo diferentes condiciones ambientales y niveles de actividad. Skoldstrom (1987) registró un mayor incremento de la temperatura corporal cuando se realizó ejercicio ligero sobre tapiz rodante ( $3.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) en condiciones ambientales secas y cálidas ( $45 \text{ }^\circ\text{C}$  y 15% de humedad relativa) portando la ropa de protección. La temperatura rectal se incrementó a una tasa de  $2.4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  respecto a una tasa de incremento de  $0.23 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  cuando se usó ropa deportiva. Fogarty et al (2004) examinaron la respuesta cardiovascular y térmica del traje de protección usado por los bomberos de estructura, en condiciones de estrés térmico incompensable, implementando un protocolo en cicloergómetro que permitió realizar el ejercicio recostados, lo que facilitó la medición del volumen sistólico y del flujo sanguíneo cutáneo. Estos autores obtuvieron un incremento significativo de la temperatura corporal y de la frecuencia cardiaca cuando se portaba el equipo de protección respecto a la condición de ropa deportiva, confirmando los resultados obtenidos en los estudios anteriores. Otros estudios han obtenido resultados similares al comparar la respuesta termorregulatoria en función de la ropa de protección (Bruce-Low et al., 2007; Caldwell et al., 2011; Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014).

Con respecto al comportamiento de los trajes de protección usados por los bomberos forestales la literatura es limitada. De nuevo sólo el trabajo de Budd et al., (1997c) con bomberos forestales australianos ha tratado sobre la

repercusión del equipo de protección en el estrés térmico y cardiovascular de los sujetos implicados. En un estudio en cámara climática Budd et al. (1997c) compararon dos tipos de equipación usados durante la extinción de incendios en Australia. Mientras que la equipación más aislante constaba de casco, guantes, gafas, botas, traje de manga larga con tratamiento ignífugo y un gramaje de  $355 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  con un peso total del equipo de 4.26 kg; la equipación ligera constaba de botas, gafas, guantes y casco, pantalones y camisa de manga larga de algodón sin tratar y con un peso del conjuntos de 3.52 kg. Ambos tipos de equipación fueron comparados durante la realización de ejercicio moderado (382-464 W) de 60 minutos de duración con temperaturas ambientales de 30 °C y 33% de humedad relativa sin focos de calor radiante. Los resultados mostraron que el traje más aislante redujo la evaporación del sudor en un 21%, limitando la disipación del calor metabólico generado, induciendo por tanto un 43% más de sudoración. Asimismo, el incremento de la temperatura corporal (1.5 vs. 2.1 °C) y la frecuencia cardíaca (119 vs. 149 ppm) se vieron significativamente incrementadas cuando los sujetos portaron el equipo de protección más aislante y pesado.

#### *1.4.5. Respuesta fisiológica. Interrelación de factores*

Los sistemas más ampliamente estudiados en la literatura implicados en la respuesta fisiológica de los bomberos, son el sistema termorregulatorio a través del comportamiento de la temperatura corporal y el sistema cardiovascular a través del comportamiento de la frecuencia cardíaca (Richmond et al., 2008) ya que son las respuestas más importantes en relación con la seguridad y salud durante la realización de trabajos en calor (Budd, 2001).

Varios trabajos han analizado la respuesta térmica y cardiovascular de los bomberos de ciudad. Romet y Frim (1987) documentaron la respuesta fisiológica durante la realización de varias actividades de entrenamiento de una brigada de bomberos. La actividad más demandante fue el rescate de víctimas realizado durante 24 min en temperaturas ambientales de 16 °C, donde la frecuencia cardiaca alcanzó valores de 153 ppm (85% FC máxima teórica) y la temperatura rectal se incrementó de 37.7 a 39 °C.

Estudios subsiguientes incluyeron medidas subjetivas como escala subjetiva de esfuerzo (Borg, 1982) o la escala de sensación térmica (Young et al., 1987), ya que se contribuyen a separar los efectos térmicos de los meramente cardiovasculares, durante la extinción (Barr et al., 2010). Smith et al., (1996) realizaron un estudio que consistió en analizar la respuesta fisiológica de los bomberos durante el desarrollo de dos ejercicios de entrenamiento en edificios con presencia de fuego real.

El primer ejercicio consistía en transportar durante 8 min una manguera mientras que los 8 min restantes debían cortar madera en temperatura ambiental de entre 76.7 y 93.0 °C. Al final del primer ejercicio RPE y la sensación térmica fueron catalogadas como “algo duras” (RPE 13) y templadas (sensación térmica de 5); la temperatura timpánica y la frecuencia cardiaca fueron de 38.8 °C y 170 ppm (89% FC máxima teórica) respectivamente, alcanzándose asimismo valores de lactato de 4 mmol·L<sup>-1</sup>. Al finalizar el segundo ejercicio los sujetos presentaron frecuencias cardiacas de 186 ppm (97% FC máxima teórica) con temperaturas timpánicas de 40 °C, mientras que las escalas subjetivas de esfuerzo y sensación térmica alcanzaron valores de 16 (“muy duro”) y 6 (“calor”) respectivamente.

El mismo grupo de investigación realizó más estudios acerca de la repercusión fisiológica del trabajo en calor en bomberos de estructura. Empleando tareas de entrenamiento similares a las anteriores, Smith et al. (2001) describieron incrementos de en la temperatura rectal y frecuencia cardiaca de 36.7 a 38.1 °C y de 70 a 186 ppm respectivamente, constatando que la temperatura corporal continuó incrementándose hasta alcanzar los 38.7 °C durante los 10 min posteriores a la finalización de los ejercicios, hecho también constatado en el estudio desarrollado por Eglin et al. (2004).

Realizar tareas de extinción de incendios en diferentes condiciones ambientales permite comparar de modo independiente el efecto de las condiciones ambientales y el nivel de actividad desarrollado. Así varios estudios se han centrado en analizar la respuesta fisiológica de los bomberos de estructura en condiciones ambientales templadas. Griefahn et al. (2003) constataron en ejercicios de simulación de incendios llevados a cabo en temperaturas ambientales de entre 11 y 25 °C, frecuencias cardiacas de 160 ppm e incrementos de la temperatura de 0.9 °C para una duración del ejercicio de 15 min. Otros estudios han obtenido en condiciones ambientales templadas (*i.e.*, 14 - 27 °C) tasas de incremento de la temperatura timpánica Smith et al., (1997), de la temperatura gastrointestinal (Rayson et al., 2005; Carter et al., 2007) o de la temperatura rectal (Richmond et al., 2008) de 0.01, 0.017, 0.05 o 0.047 °C·min<sup>-1</sup> respectivamente. Sin embargo, bajo condiciones de calor (*i.e* 40-90 °C) Smith et al., (1997) describieron valores de incremento de la temperatura timpánica de 0.11 °C·min<sup>-1</sup>, que resultan significativamente más elevados que los aportada por Rayson et al., (2005) y Carter et al., (2007) con unas tasas de incremento de 0.03

y  $0.054 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  respectivamente. En todos estos estudios comparados con la situación ambiental templada, los bomberos estuvieron bajo una mayor carga fisiológica durante las tareas realizadas en ambientes cálidos como corroboran las frecuencias cardiacas y tasas de incremento de la temperatura central significativamente mayores. Estas mismas conclusiones fueron obtenidas por Eglin et al. (2004) al analizar las respuesta fisiológica de los instructores de bomberos durante la realización de entrenamientos con fuego real donde las temperaturas ambientales alcanzaron valores de  $74 \pm 42 \text{ } ^\circ\text{C}$  y las temperaturas rectales de los sujetos se incrementaron  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$  en 33 minutos de duración de la prueba.

En extinción de incendios forestales, Budd et al. (1997b) durante la realización de quemas experimentales en Australia, analizaron la temperatura la temperatura rectal que alcanzó un valor promedio de  $38.2 \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$  para una duración media del trabajo de 117 min. La sensación subjetiva de esfuerzo fue “bastante duro” (RPE  $13.6 \pm 1.7$ ) y la sensación térmica subjetiva fue considerada como “bastante cálida”. Recientemente, Larsen et al. (2015) analizaron la respuesta fisiológica durante la realización de simulación de extinción de incendios forestales con una duración total de 3h. Para ello compararon la respuesta termofisiológica completa del grupo expuesto a  $45 \text{ } ^\circ\text{C}$  frente al grupo en condiciones templadas  $18 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Los bomberos mostraron un descenso del 19% de la productividad al realizar apertura de línea de defensa en condiciones cálidas. La temperatura central y de la piel fueron  $0.99 \pm 0.20$  y  $5.45 \pm 0.53 \text{ } ^\circ\text{C}$  más elevadas, respectivamente y la frecuencia cardíaca fue 14 - 36 ppm mayor en condiciones de estrés térmico. Las pérdidas de sudor fueron

mayores en el calor ( $1886 \pm 474$  mL) en comparación con el ambiente templado ( $462 \pm 392$  mL). La RPE promedio de los participantes fue mayor en calor  $15.6 \pm 0.9$  vs.  $12.6 \pm 0.9$  en la prueba control. Del mismo modo, la puntuación de la sensación térmica de los bomberos fue significativamente más alta en condiciones ambientales cálidas ( $6.4 \pm 0.5$ ) en comparación con la prueba realizada en ambiente templado ( $4.4 \pm 0.4$ ).





## **2. OBJETIVOS**



## 2. OBJETIVOS

Los objetivos de esta Tesis Doctoral fueron estudiar la respuesta fisiológica que experimenta el personal especialista en extinción de incendios forestales (PEEIF) en función de la ropa de protección así como caracterizar, en condiciones reales, el ambiente térmico al que se exponen durante la extinción de los incendios forestales.

Para la consecución de estos objetivos generales se llevaron a cabo cuatro estudios en los que se plantearon diferentes objetivos específicos que se detallan a continuación:

### **Estudio 1:** *Impacto de diferentes trajes de protección en la respuesta fisiológica del PEEIF*

- Analizar, bajo condiciones ambientales cálidas y con una carga de trabajo moderada, el efecto que tiene en la respuesta

fisiológica del PEEIF el uso de cuatro trajes de protección de diferente composición.

**Estudio 2:** *Repercusión del traje de protección en la respuesta fisiológica del PEEIF a intensidades moderadas-altas de trabajo*

- Analizar, en condiciones ambientales cálidas, el efecto que el traje de protección induce en la respuesta fisiológica y subjetiva del PEEIF ante la realización de un trabajo físico moderado-intenso.

**Estudio 3:** *Influencia del EPI en la respuesta fisiológica del PEEIF a intensidades moderadas-altas de trabajo*

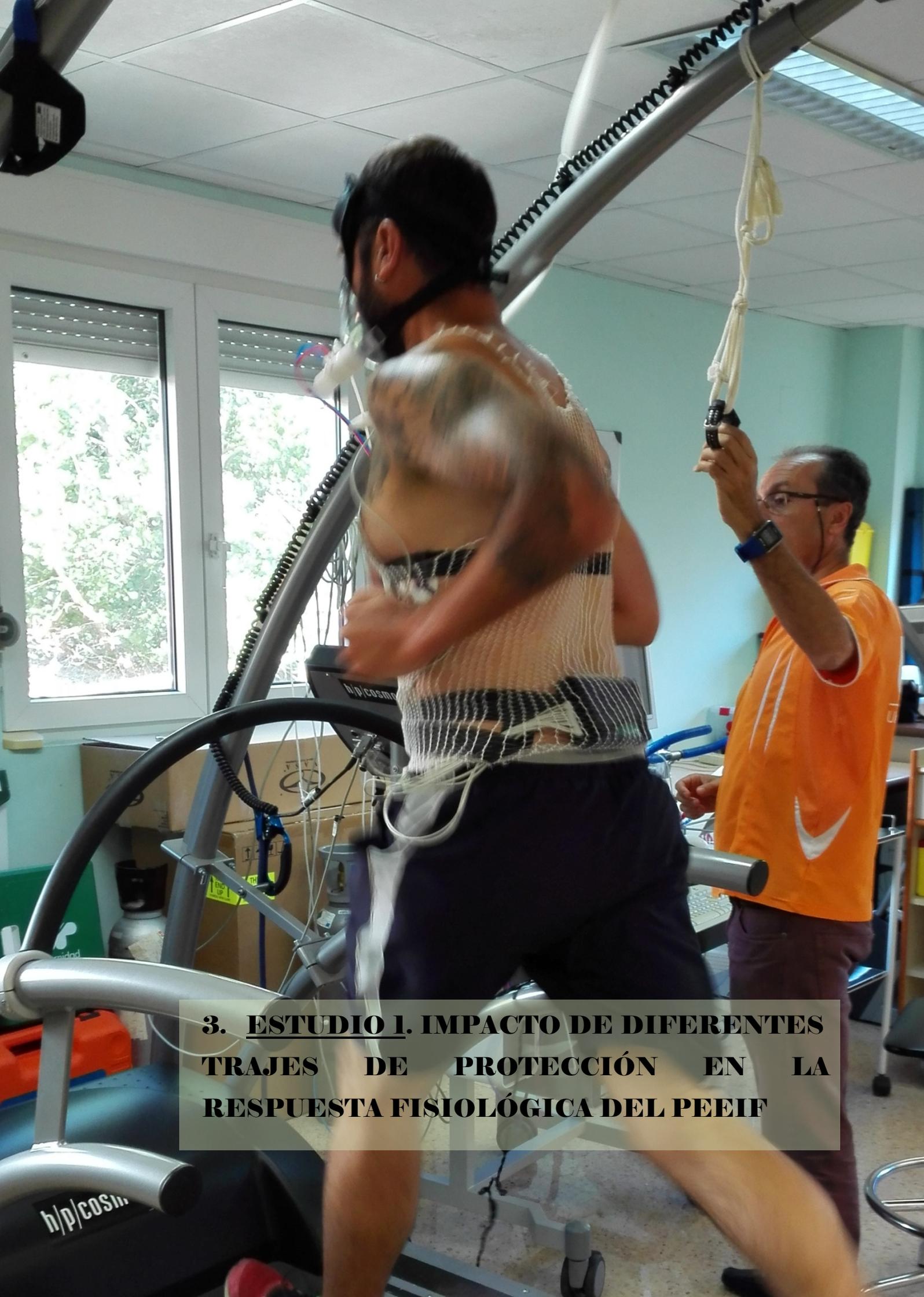
- Analizar, en condiciones ambientales cálidas, el efecto que el equipo de protección individual (EPI) supone en la respuesta fisiológica y subjetiva del PEEIF ante la realización de un trabajo físico intenso.

**Estudio 4:** *Caracterización del ambiente térmico durante la extinción de incendios forestales*

- Caracterizar el ambiente térmico de trabajo en función de las tareas realizadas.
- Analizar el factor de atenuación que tiene el traje de protección en el flujo de calor.

- Estimar la dosis de radiación térmica recibida y la probabilidad de sufrir quemaduras durante la extinción de incendios forestales reales.





**3. ESTUDIO 1. IMPACTO DE DIFERENTES TRAJES DE PROTECCIÓN EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF**



### **3.1. INTRODUCCIÓN**

La lucha contra incendios forestales es una ocupación extremadamente exigente (Ruby et al., 2002; Cuddy et al., 2015) que adquiere una relevancia especial durante los meses de verano. Las actividades realizadas durante la extinción de incendios implican la utilización de herramientas manuales de diferente peso (3-20 kg) (Rodríguez-Marroyo et al., 2012) en condiciones adversas que suponen la inhalación de humo (Wegesser et al., 2009), trabajar en zonas de elevada pendiente (Brotherhood et al., 1997) en condiciones de calor ambiental (Raimundo y Figueiredo, 2009; Rodríguez-Marroyo et al., 2012). Estas condiciones en conjunto contribuyen a la alta carga fisiológica analizada durante la extinción de incendios forestales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

Realizar tareas exigentes en entornos cálidos está asociado con un mayor estrés por calor (Gonzalez-Alonso et al., 1999; Chevront et al., 2010). El uso adicional de ropa de protección puede incrementar la respuesta fisiológica del

personal de extinción (Bruce-Low et al., 2007) y, como consecuencia, limitar su rendimiento (Selkirk y McLellan, 2004; Taylor et al., 2012).

La ropa de protección influye en los mecanismos termorregulatorios de disipación del calor, ya que reduce la transferencia del mismo y la evaporación del sudor entre la piel y el ambiente exterior (Holmér, 2006). Sin embargo, protege a los sujetos de una amplia variedad de peligros relacionados con el trabajo, principalmente derivados de la exposición al calor o al contacto directo con la llama (Nayak et al., 2014).

Esta ropa se fabrica según las normas de seguridad (ISO 15384, 2003), en las que se especifican los requisitos técnicos de los tejidos. Sin embargo, esta certificación no tiene en cuenta el proceso de manufactura de los trajes, que no permite extrapolar directamente la respuesta que estos tejidos inducirán en la termorregulación una vez que constituyan un traje completo y éste sea llevado por una persona. La combinación de diseño y materiales durante el proceso de fabricación, puede afectar a su comportamiento en la respuesta termorreguladora (Havenith y Heus, 2004). Su grado de aislamiento térmico y de resistencia a la evaporación dependerá por lo tanto, del espesor de la ropa, de las capas de aire atrapadas (*e.g.*, tallaje y ajuste) y de las características de la fibra (*i.e.*, tipo de tejido, presencia de revestimientos y membranas) (Havenith, 2002).

Parece claro, pues, que debe proporcionar una protección específica que evite daños a la vez que minimiza la carga térmica y fisiológica de los sujetos, con el fin de no limitar su rendimiento. En este sentido, existe un gran número de investigaciones sobre su efecto en la respuesta termorreguladora de los bomberos

de estructuras (Sköldström, 1987; Smith y Petruzzello, 1998; Selkirk y McLellan, 2004; Holmér et al., 2006; Bruce-Low et al., 2007), en trajes de protección química (Wen et al., 2015) o en uniformes militares (Montain et al., 1994).

Esto contrasta con la escasez de estudios realizados con bomberos forestales, pues, hasta donde sabemos, sólo dos estudios previos han analizado la respuesta fisiológica de los bomberos forestales en función de diferentes configuraciones de ropa de protección (Budd et al., 1997; Den Hartog et al., 2016).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar en condiciones cálidas y a una intensidad moderada el efecto en la respuesta fisiológica del PEEIF de cuatro trajes de protección de uso frecuente en España, en función de su composición.

## **3.2. METODOLOGÍA**

### *3.2.1. Sujetos*

En el estudio participaron 8 PEEIF cuyas características antropométricas y cardiovasculares se detallan en la *Tabla 3.1*. Los sujetos realizaban ejercicio de resistencia (45-60 min / sesión de entrenamiento) tres veces por semana. Previa a su participación en el estudio se informó y explicó detalladamente los procedimientos a realizar así como las medidas de seguridad durante el protocolo, obteniéndose el consentimiento informado de cada participante. El

estudio fue desarrollado de acuerdo con las directrices de la Conferencia de Helsinki.

**Tabla 3.1. Características de los participantes (n=8).**

	Media $\pm$ SD
Edad (años)	30.8 $\pm$ 8.4
Peso (kg)	76.9 $\pm$ 10.9
Talla (m)	1.8 $\pm$ 0.1
Masa grasa <sup>A</sup> (%)	14.0 $\pm$ 3.0
A <sub>D</sub> (m <sup>2</sup> )	1.9 $\pm$ 0.2
IMC (kg·m <sup>-2</sup> )	22.9 $\pm$ 1.5
VO <sub>2</sub> max (L·min <sup>-1</sup> )	3.9 $\pm$ 0.4

IMC: Índice de masa corporal. <sup>A</sup>, determinado mediante bioimpedanciometría tetrapolar. VO<sub>2</sub>max: consumo máximo de oxígeno. A<sub>D</sub>, área corporal calculada según la ecuación de DuBois y DuBois.

### *3.2.2. Diseño experimental*

Cada sujeto realizó seis pruebas en seis sesiones diferentes. Se dejaron al menos 48 horas de separación entre pruebas, durante las cuales se pidió a los participantes que se abstuvieran de hacer ejercicio extenuante. La primera prueba consistió en un test incremental máximo previa determinación de las características antropométricas de los sujetos y su capacidad aeróbica (Bruce, 1971).

Desde la segunda hasta la sexta prueba, los sujetos realizaron, siguiendo una distribución en cuadrado latino, una prueba submáxima de 120 minutos de duración equipados con ropa de deporte (pantalón corto, camiseta de algodón, ropa interior y calcetines) y llevando cada uno de los cuatro trajes de protección (TP), habitualmente utilizados por el PEEIF. La misma ropa (camiseta de algodón, ropa interior y calcetines) se llevó bajo el TP durante cada prueba.

Durante todas las pruebas, para simular las condiciones reales de trabajo, los sujetos portaron una mochila extintora de 20 kg de peso, que se utiliza habitualmente durante la lucha contra incendios forestales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). En cada sesión se usaron las mismas zapatillas deportivas (250-300 g cada una).

Las especificaciones de los trajes analizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Características de los trajes analizados.

		TP#1	TP#2	TP#3	TP#4
Capa		individual	doble capa reflectante en los hombros	individual	individual
Composición	Viscosa ignífuga (%)	65	65	56	
	Nomex (%)	30	30	34	
	Kevlar (%)	5	5	8	
	P-140 (%)			2	
	Algodón ignífugo (%)				100
Peso (g)		1460	1560	1440	1000
Gramaje (g·m <sup>-2</sup> )		270	270	225	310
Resistencia térmica del tejido (m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )		0.0192	0.0192	0.0213	0.0260
Resistencia evaporativa del tejido (m <sup>2</sup> ·Pa·W <sup>-1</sup> )		3.79	3.79	3.45	3.51

### 3.2.3. Protocolo experimental

Todas las pruebas se realizaron en un tapiz rodante (h/p/cosmos pulsar, h/p/cosmos sports & medical GMBH, Nussdorf-Traunstein, Alemania). Cada prueba fue precedida por un período de calentamiento de 10 minutos a 8-10 km·h<sup>-1</sup> (~60% FC<sub>max</sub>) y 5 min de estiramientos. La prueba máxima se realizó de acuerdo con el protocolo descrito por Bruce (1971) comenzando a una velocidad

de  $2.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  y una pendiente del 10%. La velocidad y la pendiente se incrementaron cada 3 min hasta que los sujetos alcanzaron el agotamiento.

Las pruebas submáximas se realizaron a la misma hora del día (por la mañana, entre las 12:00 y las 16:00 h) en un laboratorio en el que se controlaron las condiciones climáticas. La temperatura del aire y la humedad relativa se mantuvieron a  $30^{\circ}\text{C}$  y 30% respectivamente, simulando las condiciones promedio descritas durante la extinción de incendios forestales reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). El protocolo consistió en seis fases de trabajo caminando a  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  con una pendiente del 1%, con 5 minutos de descanso pasivo tras cada fase. La duración de cada una fue de 15 minutos, excepto la primera que fue de 20 minutos, por lo que la duración total de la prueba fue de 120 minutos. Durante los periodos de recuperación, se administró  $0.15 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$  de agua por cada minuto de ejercicio, a una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  (Selkirk y McLellan, 2004) para evitar que la deshidratación de los sujetos limitase la tasa de sudoración (González-Alonso et al., 1999; Chevront et al., 2010). El protocolo utilizado en este estudio se basó en estudios anteriores (Selkirk y McLellan, 2004), de modo que la velocidad seleccionada supusiera una intensidad de ejercicio entre 60 y 70% de la frecuencia cardíaca máxima, lo que simula las condiciones de trabajo del PEEIF (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

#### *3.2.4. Mediciones y cálculos*

Durante la prueba máxima se monitorizó la respuesta ECG (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium) de los sujetos con el fin de detectar posibles problemas cardíacos. En todas las pruebas se registró la

frecuencia cardíaca (FC) (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) cada 5 s y el intercambio de gases (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium) se analizó respiración a respiración. El consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ) fue considerado el máximo valor de la media móvil tomada cada 30 s.

La temperatura gastrointestinal se registró a lo largo de los test submáximos utilizando una cápsula de temperatura intestinal (VitalSense, Phillips Respironics, Bend, OR, EE.UU.) que se ingería al menos 8 h antes del comienzo de las pruebas (Wen et al., 2015). La temperatura y la humedad en el interior del TP se midieron mediante la colocación de un data-logger (Termoregister TR-72U, T y D, Japón) a nivel del esternón, entre la camiseta de algodón y el TP. Los datos de temperatura y humedad, así como los datos de FC y  $VO_2$  de los últimos 5 min de cada fase de ejercicio submáximo se consideraron representativas de la fase completa. La temperatura gastrointestinal y los datos de la FC se utilizaron para calcular el índice de tensión fisiológica (PSI) de acuerdo con Tikuisis et al., (2002), usando una versión modificada de la ecuación 1 (Moran et al., 1998):

$$PSI = [5 \times (T_{gastro} - T_{gastro0}) \times (39.5 - T_{gastro})^{-1}] + [5 \times (FC - 60) \times (FC_{max} - 60)^{-1}][1]$$

donde  $T_{gastro}$  y  $FC$  son la temperatura gastrointestinal ( $^{\circ}C$ ) y la frecuencia cardíaca (ppm) registradas los últimos 5 min de cada fase de ejercicio submáximo.  $T_{gastro0}$  es la temperatura gastrointestinal al inicio de prueba y la  $FC_{max}$  es la frecuencia cardíaca máxima del sujeto medida en el laboratorio en la prueba de esfuerzo inicial.

Al final de cada fase de trabajo se tomó una muestra de sangre capilar del lóbulo de oreja previamente hiperemizado, para medir la concentración de lactato sanguíneo (Lactate Scout, Senslab, Leipzig, Alemania). Durante los últimos 30 s de cada fase de ejercicio se registró la Percepción Subjetiva de Esfuerzo (RPE) utilizando la escala de Borg (6-20) (Borg, 1982). La escala fue explicada y administrada por el mismo investigador, preguntando sobre el esfuerzo percibido usando la misma pregunta. Se colocó la escala impresa delante de los sujetos para permitir la referencia inmediata a la misma. Además, la sensación de humedad de los sujetos se registró al final de cada prueba, utilizando una escala categórica (1-9) (Havenith y Heus, 2004). Los valores 1 y 9 se identificaron con *ligeramente húmedo* y *totalmente empapado*, respectivamente.

Los sujetos en ropa interior, y cada pieza de ropa se pesaron por separado (50K150, COBOS, Hospitalet de Llobregat, Barcelona, España) al inicio y al final de cada prueba submáxima. Esto permitió calcular la producción total de sudor, el sudor retenido en la ropa y la evaporación (Havenith y Heus, 2004; Kofler et al., 2015). El sudor total fue corregido para la ingesta de líquido. No se tuvo en cuenta la pérdida de agua por respiración ya que se asumió que esta era similar entre pruebas (Saunders et al., 2005). Por último, la eficiencia del sudor se calculó como la relación entre la evaporación del sudor y el sudor total producido (Havenith y Heus, 2004; Kofler et al., 2015).

La transferencia de calor se calculó utilizando el método del balance térmico mediante la ecuación 2 (Bröde et al., 2008):

$$S = M - W - \text{DRY} - E_{\text{sk}} - \text{RES} \quad [2]$$

donde  $S$  es el almacenamiento de calor corporal,  $M$  es la producción de calor metabólico,  $W$  es el trabajo mecánico efectivo,  $RES$  es la pérdida de calor mediante conducción y evaporación respiratoria ( $RES = E_{res} + C_{res}$ ),  $E_{sk}$  es la pérdida de calor por evaporación y  $DRY$  es la transferencia de calor seco ( $DRY = C + R + K$ ). Todos los parámetros de la ecuación del balance térmico se calcularon en  $W \cdot m^{-2}$ .

La producción de calor metabólico ( $M$ ) ( $W \cdot m^{-2}$ ) se calculó mediante la ecuación 3 (Gagge y González, 1996):

$$M = [0.23(RQ) + 0.77] \times 5.873 \times VO_2 \times (60/A_D) \quad [3]$$

donde  $RQ$  es el cociente respiratorio,  $VO_2$  es el consumo de oxígeno ( $L \cdot min^{-1}$ ),  $A_D$  es la superficie corporal en  $m^2$  según la ecuación  $A_D = 0.202 \times BM^{0.425} \times altura^{0.725}$  donde  $BM$  es la peso corporal en kg y altura en m (DuBois y DuBois, 1916).

$S$  se calculó como  $(\Delta T_b \times \Delta t^{-1}) \times BM \times A_D^{-1} \times c_p$ . Donde  $\Delta T_b \times \Delta t^{-1}$  en  $^{\circ}C \cdot s^{-1}$  es la tasa de cambio de la temperatura corporal para el tiempo de prueba;  $c_p$  es el calor específico promedio de los tejidos del cuerpo humano ( $3480 J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ). Los componentes de la transferencia de calor por respiración  $E_{res}$  y  $C_{res}$  se calcularon mediante las ecuaciones 4 y 5:

$$C_{res} = 1.516 \times 10^{-3} \times M \times (28.56 + 0.641 \times P_a - 0.885 \times T_a) \quad [4]$$

$$E_{res} = 1.27 \times 10^{-3} \times M \times (59.34 - 11.63 \times P_a + 0.53 \times T_a) \quad [5]$$

donde  $P_a$  es la presión atmosférica en Pascales,  $T_a$  es la temperatura ambiental en  $^{\circ}C$  y  $M$  es la tasa de calor metabólico en  $W \cdot m^{-2}$ , calculada con la ecuación [3].

La pérdida de calor por evaporación del sudor  $E_{sk}$  se estimó como  $\lambda \cdot (m_{sw}) \cdot A_D^1$ , donde  $m_{sw}$  es la tasa de evaporación del sudor ( $g \cdot s^{-1}$ ) y  $\lambda$  es la entalpía de evaporación ( $2430 J \cdot g^{-1}$ ). DRY se obtuvo resolviendo la ecuación del balance térmico, conociendo el resto de parámetros:

$$DRY = M - W - E_{sk} - RES - S \quad [6]$$

El aislamiento térmico total de la ropa ( $I_t$ ) se calculó mediante la ecuación:

$$I_t = (T_{int} - T_a) \times DRY^{-1} \quad [7]$$

donde  $T_{int}$  es la temperatura registrada dentro del TP, ya que no se registró la temperatura de la piel. La temperatura del microambiente dentro del TP se consideró como un marcador indirecto de la temperatura de la piel (Kofler et al., 2015).

### *3.2.5. Análisis estadístico*

El cálculo del tamaño muestral se determinó mediante un análisis *a priori* de la potencia estadística ( $\alpha < 0.05$ ,  $\beta = 0.2$  de dos colas; potencia = 0.8) realizado con el software G\*Power versión 3.1.9.2 (Universidad de Kiel, Alemania), de modo que se detectara un tamaño del efecto de  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  en la temperatura gastrointestinal (Smith et al., 1995; Smith y Petruzzello, 1998). El resultado del análisis indicó que un tamaño muestral de 8 resulta suficiente.

Los resultados se expresan como media  $\pm$  desviación estándar (*SD*). La suposición de normalidad se verificó utilizando la prueba de Shapiro-Wilk. Las

variables analizadas a lo largo de los test submáximos se compararon utilizando un ANOVA de medidas repetidas con dos factores intra sujeto (Ropa × Tiempo). Se aplicó un ANOVA unidireccional con medidas repetidas para establecer diferencias entre ensayos cuando se estudió la sensación de humedad de los sujetos y los diferentes parámetros de equilibrio térmico y sudor. Cuando se encontró un valor F significativo, se utilizó el test de Bonferroni para establecer diferencias significativas entre las medias. La asunción de esfericidad se verificó mediante la prueba de Mauchly. Si no se cumplía este supuesto se aplicó el ajuste del nivel de significación mediante la  $\epsilon$  de Greenhouse-Geisser. Los valores de  $p < 0.05$  se consideraron estadísticamente significativos. Se utilizó el software estadístico SPSS V.19.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)

### **3.3. RESULTADOS**

El contraste de interacción entre la condición de la ropa y el tiempo no fue significativo para  $\text{VO}_2$ , ventilación, FC, concentración de lactato (*Figura 3.1*), ni para la temperatura gastrointestinal, temperatura dentro del TP, PSI (*Figura 3.2*) y RPE (*Figura 3.3*). Los valores medios analizados durante las pruebas fueron:  $1.5 \pm 0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $48.4 \pm 8.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $114 \pm 15 \text{ ppm}$ ,  $1.5 \pm 0.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $37.4 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $32.7 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $3.2 \pm 0.7$  y  $10.7 \pm 2.0$ , respectivamente. Sin embargo, el incremento de la temperatura gastrointestinal fue significativamente mayor en TP#3 ( $0.7 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) respecto al analizado en los otros trajes de protección ( $0.2 \pm 0.3$ ,  $0.2 \pm 0.5$  y  $0.2 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  para TP#1, TP#2, TP#4, respectivamente) y la configuración en ropa de deporte ( $0.3 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

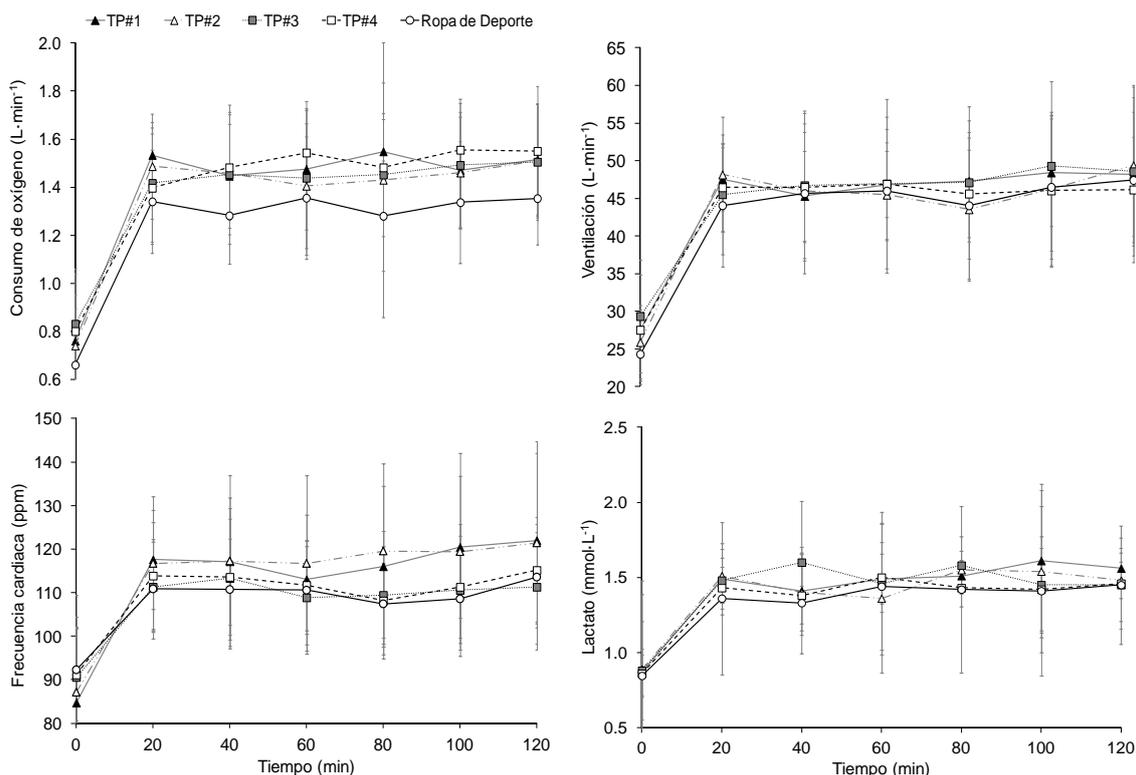


Figura 3.1. Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardiaca y concentración de lactato para los diferentes trajes de protección (TP) analizados en este estudio y la configuración en ropa de deporte.

La humedad relativa del microambiente bajo el TP fue mayor ( $p < 0.05$ ) en TP#2, TP#3 que en TP#4 ( $81.2 \pm 4.7$  y  $77.7 \pm 5.0$  vs.  $71.7 \pm 4.9\%$ ). A partir del minuto 60 de prueba, los valores más bajos de humedad relativa ( $p < 0.05$ ) se analizaron en el TP#4 (Figura 3.4). Los valores de humedad aumentaron más rápidamente durante la primera parte de prueba, entre el minuto 0 y el 60 y se ralentizaron durante la segunda hora, del minuto 60 al 120 (Figura 3.2).

Globalmente, se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad relativa interior ( $p < 0.05$ ) entre los datos analizados al inicio del test 5-20 min (~63% HR) frente a los analizados en la segunda parte de cada prueba 60-120 min (~84% HR).

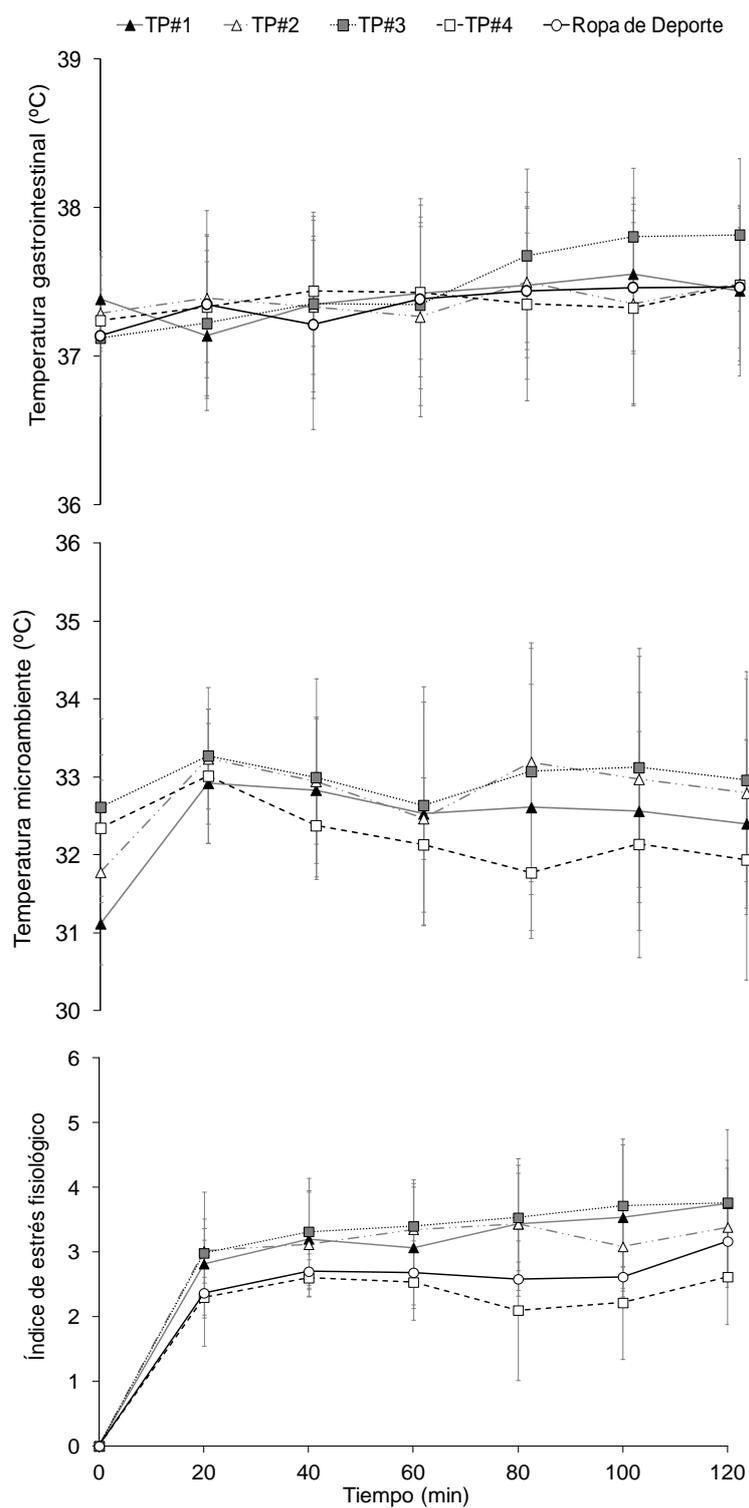


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura gastrointestinal, temperatura del microambiente e índice de estrés fisiológico (PSI) para los diferentes TP analizados en este estudio y la configuración en ropa de deporte.

Contrariamente a lo esperado, la producción total de sudor fue similar en todos los TP y en la configuración en ropa de deporte (Tabla 3.3). El residuo de sudor en la ropa interior fue similar en todos los TP. Sin embargo, el sudor retenido en TP#1 fue el más bajo ( $p<0.05$ ) y, como consecuencia, la eficiencia evaporativa del TP#1 fue la más alta ( $p<0.05$ ) de todos los TP analizados en este estudio.

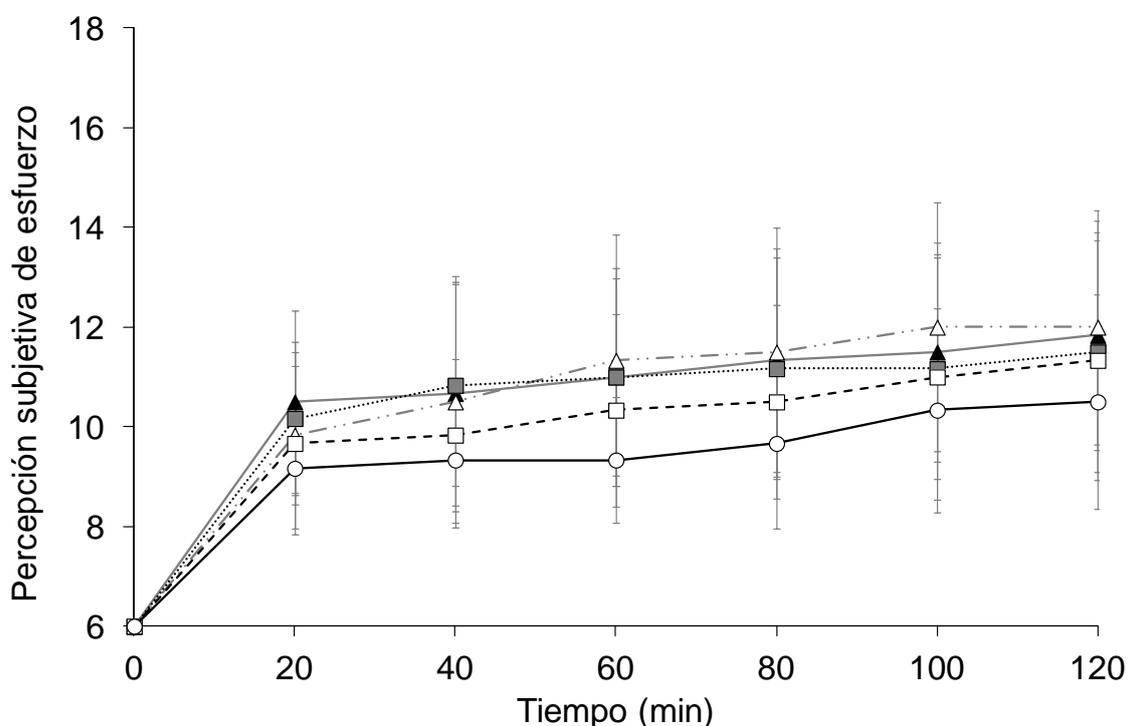


Figura 3.3. Comportamiento de la percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) para los diferentes TP analizados en este estudio.

En línea con esto, la menor sensación de humedad ( $p<0.05$ ) se observó con el TP#1 ( $5.6 \pm 0.3$ ,  $7.6 \pm 0.9$ ,  $7.0 \pm 0.6$  y  $8.2 \pm 0.5$  para TP#1, TP#2, TP#3 y TP#4, respectivamente). El valor más bajo de sensación de humedad se obtuvo cuando los sujetos llevaban el equipo deportivo ( $3.8 \pm 1.0$ ) en línea con la menor cantidad de sudor retenido en esta configuración.

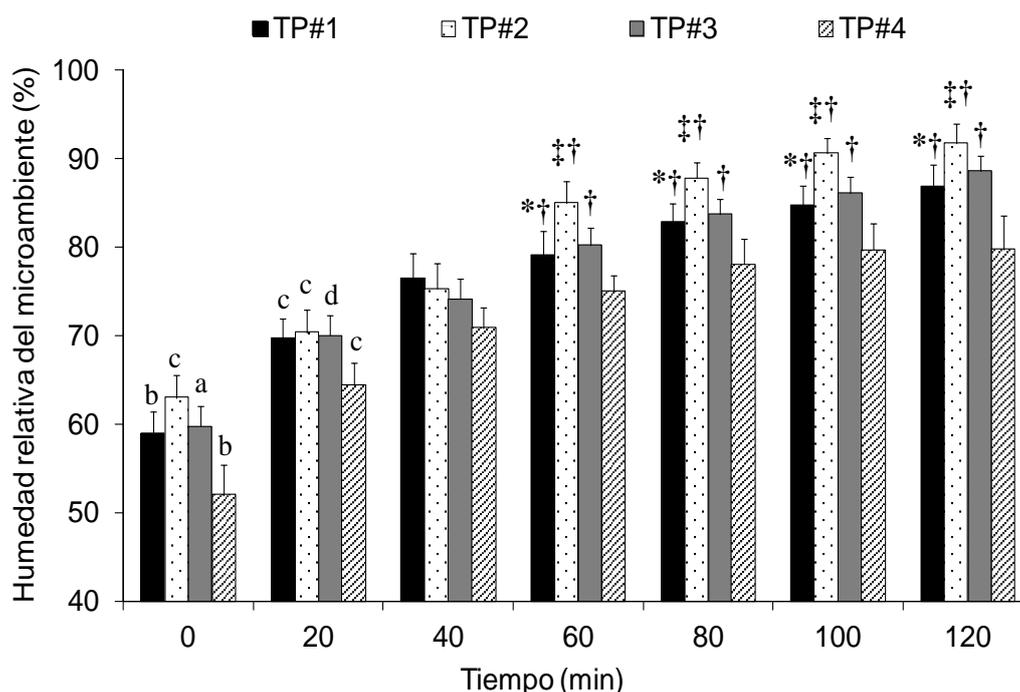


Figura 3.4. Comportamiento de la humedad relativa registrada durante las pruebas en los diferentes trajes de protección (TP). \*: diferencias con TP#2 ( $p < 0.05$ ). ‡: diferencias con TP#3 ( $p < 0.05$ ). †: diferencias con TP#4 ( $p < 0.05$ ). <sup>a</sup>: diferencias con 20-120 ( $p < 0.05$ ). <sup>b</sup>: diferencias con 40-120 ( $p < 0.05$ ). <sup>c</sup>: diferencias con 60-120 ( $p < 0.05$ ). <sup>d</sup>: diferencias con 80-120 ( $p < 0.05$ ).

Tabla 3.3. Parámetros de sudoración (media  $\pm$  SD).

	TP#1	TP#2	TP# 3	TP#4	Ropa de deporte
Sudoración (g)	1910 $\pm$ 360	2342 $\pm$ 450	2110 $\pm$ 390	1968 $\pm$ 370	1925 $\pm$ 447
Sudor retenido ropa interior (g)	367 $\pm$ 53	368 $\pm$ 70	361 $\pm$ 54	409 $\pm$ 61	335 $\pm$ 156
Sudor retenido en traje (g)	178 $\pm$ 51*‡†	579 $\pm$ 278	545 $\pm$ 156	418 $\pm$ 124	
Sudor evaporado (g)	1514 $\pm$ 327	1395 $\pm$ 161	1274 $\pm$ 268	1189 $\pm$ 338\$	1609 $\pm$ 251
Eficiencia evaporativa (%)	74 $\pm$ 5*‡†\$	61 $\pm$ 7\$	59 $\pm$ 5\$	58 $\pm$ 9	84 $\pm$ 8

TP, traje de protección. \*: diferencias con TP#2 ( $p < 0.05$ ). ‡: diferencias con TP#3 ( $p < 0.05$ ). †: diferencias con TP#4 ( $p < 0.05$ ). \$: diferencias con Ropa de deporte ( $p < 0.05$ ).

Los parámetros del balance térmico se muestran en la *Tabla 4*. Solo la transferencia de calor seco y el aislamiento térmico en el TP#3 resultaron significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) respecto a TP#1 y TP#4, observándose la mayor transferencia de calor seco y el mayor aislamiento térmico en el TP#3.

Tabla 3.4. Parámetros del balance térmico (media  $\pm$  SD).

	TP#1	TP#2	TP#3	TP#4
Calor almacenado ( $W \cdot m^{-2}$ )	4.5 $\pm$ 7.5	5.5 $\pm$ 14.0	8.1 $\pm$ 6.3	3.8 $\pm$ 6.0
Producción neta calor metabólico ( $W \cdot m^{-2}$ )	250.5 $\pm$ 23.7	238.4 $\pm$ 26.1	243.2 $\pm$ 34.9	248.1 $\pm$ 22.4
Intercambio de calor por respiración ( $W \cdot m^{-2}$ )	10.2 $\pm$ 1.0	9.7 $\pm$ 1.0	9.9 $\pm$ 0.9	10.1 $\pm$ 0.9
Evaporación ( $W \cdot m^{-2}$ )	213.2 $\pm$ 31.4	205.2 $\pm$ 18.6	208.5 $\pm$ 21.2	203.7 $\pm$ 26.5
Intercambio de calor seco ( $W \cdot m^{-2}$ )	24.9 $\pm$ 14.6‡	18.3 $\pm$ 11.8	5.5 $\pm$ 4.9†	26.1 $\pm$ 13.7
Aislamiento total de la ropa $I_r$ ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	0.09 $\pm$ 0.06‡	0.21 $\pm$ 0.10	0.31 $\pm$ 0.18†	0.08 $\pm$ 0.09

‡: diferencias con TP#3 ( $p < 0.05$ ). †: diferencias con TP#4 ( $p < 0.05$ ).

### 3.4. DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue investigar el efecto de diferentes composiciones de los TP en la respuesta fisiológica de los bomberos forestales. Contrariamente a lo esperado, no se hallaron diferencias significativas en las variables fisiológicas analizadas entre las diferentes configuraciones utilizadas (*Figura 3.1*). Trabajos previos (Baker et al., 2000; Dorman y Havenith, 2009; Wen et al., 2015) han reportado un incremento de 10-20% de la respuesta fisiológica ( $VO_2$ ) con el uso de distintos TP. Otros trabajos (Sköldström, 1987; Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014) han analizado incrementos mayores ( $>20\%$ ) en bomberos de estructura cuando usaron su equipo de respiración autónoma, debido al aumento de peso (10-20 kg) del conjunto (Lee et al., 2014). El incremento medio observado en este estudio al llevar puesto el TP fue menor,  $\sim 12\%$ . Posiblemente, esto fue debido al menor aislamiento térmico de los trajes usados por los bomberos forestales ( $\sim 0.23 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ) (Raimundo y Figueiredo, 2009) frente a los de bomberos de estructura ( $0.47 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ) (Holmér et al., 2006), lo que favorecería una mayor disipación del calor. Por otro lado, en este estudio no se usaron guantes, casco ni botas, lo cual condicionó la respuesta

termorreguladora de los sujetos al aumentar la superficie corporal expuesta al ambiente y facilitar así la pérdida de calor (Holmér, 2006; Lee et al., 2014). Se ha cuantificado recientemente que el uso de estos componentes puede incrementar ~4% el  $\text{VO}_2$ . Lee et al. (2014) no encontraron diferencias significativas al comparar el  $\text{VO}_2$ , HR y temperatura rectal de bomberos de estructura cuando llevaron puesto su ropa de protección sin guantes, casco ni botas frente a una configuración en ropa de deporte.

De hecho, no se encontraron diferencias en la respuesta cardiorrespiratoria ni en la RPE cuando se comparó un traje ignífugo ligero, similar a los analizados en este estudio, respecto al control en ropa deportiva (Kofler et al., 2015). Por otro lado, el efecto que tuvieron los PPC sobre la respuesta fisiológica de los sujetos pudo atenuarse debido a su condición aeróbica (Selkirk y McLellan, 2001). El  $\text{VO}_{2\text{max}}$  analizado en este estudio fue ~28% mayor al descrito previamente (~43  $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) en bomberos forestales (Phillips et al., 2011). Los sujetos con una mejor condición física presentan una mayor tolerancia al esfuerzo al portar ropa de protección en condiciones de estrés térmico (Selkirk y McLellan, 2001).

Llevar un TP en ambientes calurosos se ha asociado con un aumento de la temperatura corporal (Smith et al., 1998; Bruce-Low et al., 2007). Sin embargo en condiciones ambientales moderadas, como las de este estudio, no se observaron diferencias significativas en la temperatura gastrointestinal (*Figura 3.2*). Este hallazgo coincide con los obtenidos en trabajos previos realizados en condiciones similares con ropa de protección ligera (Wang et al., 2013; Kofler et

al., 2015). La temperatura gastrointestinal se mantuvo durante todas las pruebas por debajo de 39.5 °C, valor descrito como limitante durante la realización de ejercicio en calor (González-Alonso et al., 1999). El mantenimiento de la temperatura cuando los sujetos llevaron los TP posiblemente se consiguió a expensas de un aumento del estrés cardiovascular. De hecho, la FC media analizada fue ~5% mayor cuando los sujetos llevaron los PPC. Se puede especular que este incremento fue debido al aumento de la circulación cutánea con el fin de favorecer la disipación del calor (Cheuvront et al., 2010).

Globalmente, se analizó una diferencia de ~2.5 °C entre la temperatura del microclima dentro del TP y la temperatura exterior. Sin embargo, la temperatura media del microambiente del TP#2 and TP#3 fue 0.8 °C mayor que el resto de los trajes, acentuándose más después de los primeros 60 min de prueba (*Figura 3.2*). Este hecho podría haber limitado la transferencia de calor seco en estos TP (*Tabla 3.4*) y por tanto la disipación del calor metabólico (Holmér, 2006). La menor transferencia de calor seco se analizó en TP#3 (*Tabla 3.4*), lo cual podría ser debido a su menor porosidad. Los trajes analizados están fabricados con tejidos altamente resistentes al calor (*e.g.*, Nomex y Kevlar) mezclados con viscosa ignífuga, la cual confiere al traje una mayor permeabilidad al aire y confort (Yoo y Barker, 2005). La composición del TP#3 contiene un 10% menos de viscosa (*Tabla 3.2*) por lo que su porosidad y permeabilidad al aire se vio reducida, afectando así negativamente a la transferencia de calor seco (*Tabla 3.4*). Ello explicaría también, los mayores incrementos de temperatura gastrointestinal analizados en TP#3 (0.7 °C) frente al incremento analizado en las otras configuraciones (~0.3 °C). La transferencia de

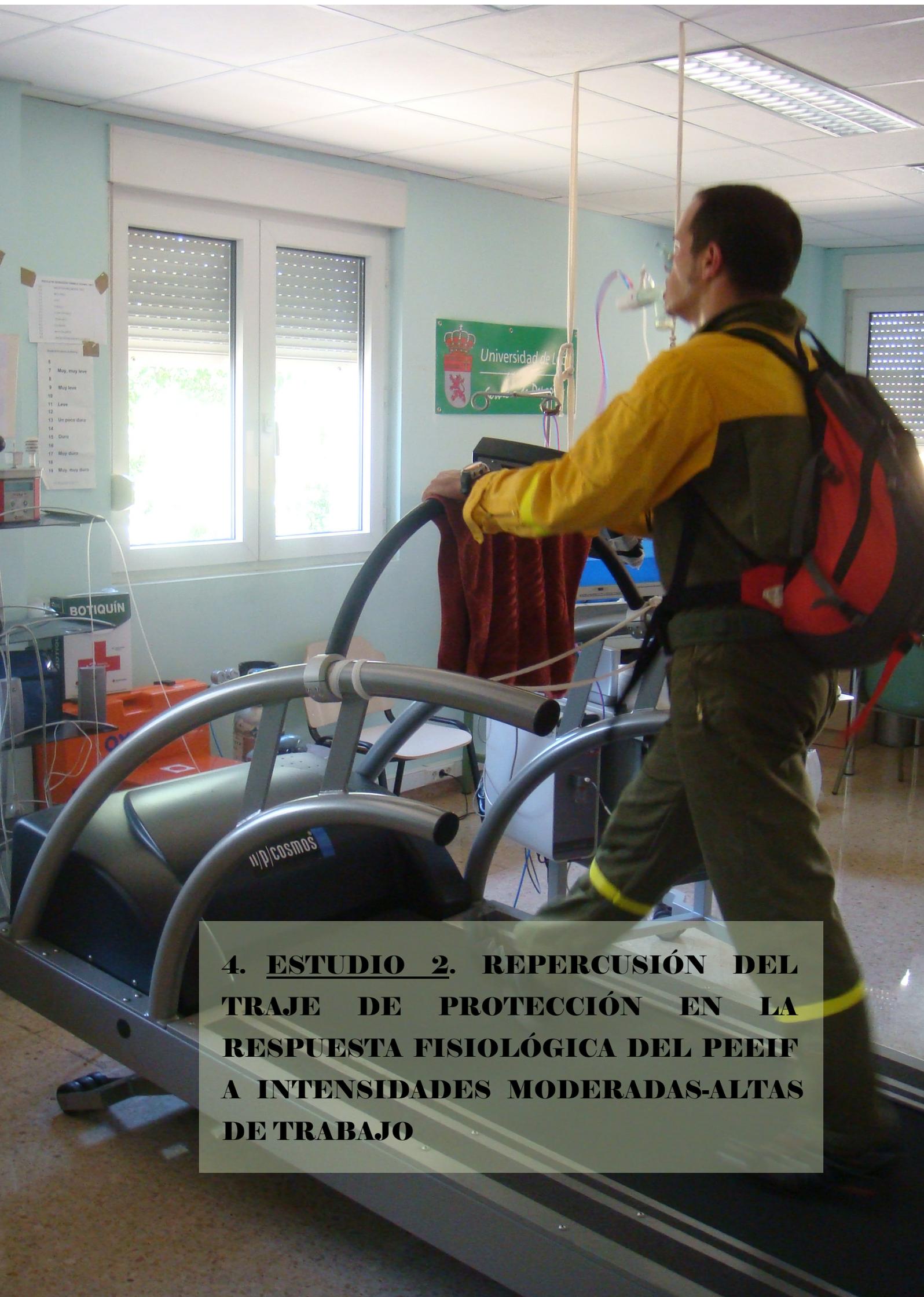
calor por evaporación también pudo verse afectada en TP#2 and TP#3 debido a la mayor HR analizada bajo estos TP ya que diversos estudios han relacionado el mayor contenido de humedad en el microambiente con la menor evaporación efectiva del sudor (Kwon et al., 1998; Yoo y Barker, 2005; Bröde et al., 2008).

Aunque las menores HR fueron analizadas en el PPC#4 (*Figura 3.4*) esto no conllevó un aumento de la evaporación del sudor. De hecho, los valores más bajos fueron analizados en PPC#4 (*Tabla 3.3*), obteniéndose una eficiencia evaporativa similar a la de PPC#2 y PPC#3 (~60%). La composición del TP#4 (100% algodón) y el mayor espesor podrían haber condicionado este comportamiento (Yoo y Barker, 2005). Se ha descrito la elevada capacidad que tiene el algodón para retener la humedad y su poca eficiencia evaporativa cuando la sudoración es abundante (Kwon et al., 1998). Estos resultados confirman hallazgos anteriores (Holmer, 1985), donde se resalta la alta capacidad que tienen las fibras sintéticas (*i.e.*, poliéster, nylon, aramidas) para transferir la humedad rápidamente al exterior.

Una mayor retención de humedad en los TP podría ser beneficioso para reducir el estrés térmico de los sujetos, ya que incrementaría su conductividad térmica (Chen, 2003; Keiser y Rossi, 2008). Además, el movimiento del cuerpo al caminar genera corrientes de aire que mejoran la transferencia de calor al aumentar la ventilación (Qian y Fan, 2009). Esta convección forzada debido al movimiento podría haber ayudado a la evaporación del sudor acumulado en los TP en el transcurso de la prueba (Lotens y Havenith, 1995; Bröde et al., 2008), evitando así un incremento desmesurado de la de la respuesta termofisiológica de los sujetos al final de las pruebas (*Figura 3.1*).

Sin embargo, una mayor retención de humedad en el TP podría ser una desventaja durante la extinción de incendios forestales. En estas situaciones los bomberos forestales están expuestos tanto a calor radiante como convectivo (Raimundo y Figueiredo, 2009), con flujos de calor que oscilan entre 0.42-8.37 kW·m<sup>-2</sup> (Mäkinen, 2005). Bajo estas circunstancias se invertiría la transferencia de calor, pasando el cuerpo a ganar calor en lugar de disiparlo (Holmér, 2006) por lo que la humedad en los TP incrementaría el riesgo de sufrir quemaduras por escaldadura (Keiser y Rossi, 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, el TP#1 sería el más ventajoso para la protección de los bomberos forestales ya que retuvo ~65% menos de humedad (*Tabla 3.3*). Con este TP los sujetos obtuvieron el mayor confort, lo cual podría afectar a la eficiencia y el rendimiento en el trabajo de los bomberos forestales (Nayak et al, 2014).



**4. ESTUDIO 2. REPERCUSIÓN DEL TRAJE DE PROTECCIÓN EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF A INTENSIDADES MODERADAS-ALTAS DE TRABAJO**



#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Diversos estudios han puesto de manifiesto la influencia que tiene llevar un traje de protección en la respuesta termofisiológica de los sujetos (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Baker et al., 2000; Fogarty et al., 2004, Dreger et al., 2006; Holmér et al., 2006; Bruce-Low et al., 2007; Dorman y Havenith, 2009; Lee et al., 2014; Kofler et al., 2015; Wen et al., 2015; Fontana et al., 2016). Así, se ha descrito un incremento del  $\text{VO}_2$ , FC, temperatura corporal, temperatura de la piel, tasa de sudoración, percepción de esfuerzo y sensación térmica que se ha vinculado al incremento del estrés térmico que supone el uso del traje de protección (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Baker et al., 2000).

Además de la ropa de protección, otras variables como las condiciones ambientales en las que se realizan las pruebas y la intensidad del ejercicio físico realizado, pueden afectar al estrés térmico (Selkirk y McLellan, 2004; Fontana et al., 2016). Por ello, se puede pensar que la utilización de un mismo traje de

protección bajo condiciones distintas (*e.g.*, condiciones ambientales e intensidad del ejercicio) puede conllevar una respuesta termofisiológica diferente (Selkirk y McLellan, 2004). Este hecho debería ser tenido en cuenta a la hora de valorar las repercusiones de la ropa de protección en la respuesta fisiológica de los sujetos.

Existe una gran cantidad de estudios que han analizado el efecto que tienen diferentes trajes en bomberos de estructura (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Baker et al., 2000; Fogarty et al., 2004, Dreger et al., 2006; Bruce-Low et al., 2007; Lee et al., 2014). La mayoría de estos trabajos han sido realizados bajo condiciones ambientales templadas (Smith et al., 1995; Baker et al., 2000; Lee et al., 2014) o cálidas (Fogarty et al., 2004; Selkirk y McLellan, 2004; Holmér et al., 2006). Además, mayoritariamente se han usado intensidades de esfuerzo moderadas (*i.e.*,  $<360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), simulando las analizadas en situaciones reales (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Holmér et al., 2006). Posiblemente, las características de los trajes usados por los bomberos de estructura hayan sido suficientes para incrementar la respuesta fisiológica analizada en estos trabajos (Holmér, 2006; Dorman y Havenith, 2009). Sin embargo, existen ciertos estudios que únicamente observaron una respuesta fisiológica incrementada con la ropa de protección, cuando se aumentó la intensidad del ejercicio (Baker et al., 2000; Fogarty et al., 2004; Bruce-Low et al., 2007).

Se puede esperar que los trajes con un menor aislamiento térmico, como los usados por los bomberos forestales, no tengan un efecto muy marcado en la respuesta fisiológica de los sujetos (Dorman y Havenith, 2009). Así mismo, podrían tener una repercusión diferente en función del tipo de ejercicio realizado

(Dorman y Havenith, 2009) y su intensidad (Selkirk y McLellan, 2004; Fontana et al., 2016). Los pocos estudios existentes que han valorado el efecto de la ropa de protección en bomberos forestales, han seleccionado intensidades de trabajo moderadas (Budd et al., 1997; Den Hartog et al., 2016). Aunque estas intensidades representan las intensidades medias analizadas en la extinción de incendios reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2011, 2012), estos trabajadores pueden estar ~30% del tiempo (~1h) trabajando a intensidades moderadas-altas (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). Esto podría incrementar la respuesta fisiológica de los sujetos ante el uso del traje de protección (Selkirk y McLellan, 2004; Fontana et al., 2016).

Por ello, el objetivo de este estudio fue analizar en condiciones ambientales cálidas, el efecto que el traje de protección supone en la respuesta fisiológica y subjetiva de los sujetos ante la realización de un trabajo físico moderado-intenso.

## **4.2. METODOLOGÍA**

### *4.2.1. Sujetos*

En el estudio participaron 8 PEEIF varones cuyas características se muestran en la *Tabla 4.1*. Los sujetos fueron físicamente activos, ya que realizaban ejercicio de resistencia (45-60 min / sesión de entrenamiento) tres veces por semana. Previa a su participación en el estudio se informó y explicó detalladamente los procedimientos a realizar así como las medidas de seguridad

durante el protocolo, obteniéndose su consentimiento informado. El estudio fue desarrollado de acuerdo con las directrices de la Conferencia de Helsinki.

**Tabla 4.1. Características de los participantes (n=8).**

	Media $\pm$ SD
Edad (años)	30.8 $\pm$ 8.4
Peso (kg)	76.9 $\pm$ 10.9
Talla (m)	1.8 $\pm$ 0.1
Masa grasa <sup>A</sup> (%)	14.0 $\pm$ 3.0
A <sub>D</sub> (m <sup>2</sup> )	1.9 $\pm$ 0.2
IMC (kg·m <sup>-2</sup> )	22.9 $\pm$ 1.5
VO <sub>2max</sub> (L·min <sup>-1</sup> )	3.93 $\pm$ 0.44

IMC: Índice de masa corporal. <sup>A</sup> Determinado mediante bioimpedanciometría tetrapolar. VO<sub>2max</sub>: consumo máximo de oxígeno. A<sub>D</sub>: área corporal calculada según la ecuación de DuBois y DuBois.

#### *4.2.2. Diseño experimental*

Cada sujeto realizó tres pruebas en 3 días diferentes, separadas al menos por 48 h. Se recomendó a los sujetos que no realizaran ejercicio físico intenso durante la realización del estudio y que realizaran una dieta alta en hidratos de carbono previa a las pruebas. La primera prueba consistió en un test incremental máximo para determinar la capacidad aeróbica de los sujetos (Bruce, 1971). En la segunda y tercera sesión los sujetos realizaron, de manera aleatoria, un test incremental de 120 min llevando puesta ropa deportiva (pantalones cortos, camiseta de algodón, ropa interior y calcetines de algodón) o un traje de extinción bajo el que se llevó una camiseta de algodón de manga corta, ropa interior de algodón y calcetines cortos de algodón. El traje fue de una pieza (mono) con una composición 65% viscosa ignífuga, 30% NOMEX® y 5% KEVLAR®, un gramaje de 270g·m<sup>-2</sup>; peso 1460 g, resistencia térmica 0.019

$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  y resistencia evaporativa  $3.79 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1}$ . Durante estas pruebas los sujetos llevaron una mochila de 20 kg para simular el peso de la mochila extintora que utilizan en la extinción de incendios (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). En todas las pruebas se llevaron las mismas zapatillas deportivas (250-300 g por zapatilla).

#### *4.2.3. Protocolo experimental*

Todas las pruebas se realizaron sobre tapiz rodante (h/p/cosmos pulsar, h/p/cosmos sports & medical GMBH, Nussdorf-Traunstein, Germany). Antes de cada prueba se realizó una sesión de calentamiento de 10 min corriendo a  $8\text{-}10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\sim 60\% \text{ FC}_{\text{max}}$ ) seguido de 5 min de estiramientos. El test máximo se realizó siguiendo la metodología de Bruce (1971). El test comenzó a una velocidad de  $2.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  y una pendiente del 10%. La velocidad y pendiente se fueron incrementando cada 3 min hasta llegar al agotamiento.

Las pruebas incrementales se realizaron a la misma hora del día (por la mañana entre las 12:00 y las 16:00 h.) en un laboratorio donde se controlaron las condiciones ambientales. La temperatura ambiental y la humedad relativa se mantuvieron a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y 30%, respectivamente, simulando las condiciones analizadas en fuegos reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

El protocolo consistió en 6 fases de trabajo caminando a  $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  con un incremento paulatino de la pendiente en cada fase (1, 2, 5, 8, 10 y 13%). Entre cada fase de ejercicio se realizó un descanso pasivo de 5 min. La duración del primer estadio fue de 20 min mientras que la de los siguientes fue de 15 min. Así la duración total de las pruebas fue de 120 min. Sin embargo, la prueba se dio por

concluida si los sujetos alcanzaron alguno de los siguientes criterios: *i*) temperatura gastrointestinal  $\geq 39.5$  °C, *ii*) alcanzar el 95% de la frecuencia máxima durante 2 min, *iii*) tener una percepción subjetiva de esfuerzo (RPE)  $\geq 19$ , *iv*) sentir náuseas, mareos y malestar general o *v*) expresar su deseo de cesar la prueba. Durante los descansos se suministraron  $0.15 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$  de agua por cada minuto de trabajo, a una temperatura de 15 °C (Selkirk y McLellan, 2004) para evitar que la deshidratación limite la tasa de sudoración (González-Alonso et al., 1999; Chevront et al., 2010).

El protocolo diseñado fue similar al utilizado en estudios previos (Selkirk y McLellan, 2004). La velocidad y pendientes seleccionadas permitieron que los sujetos alcanzasen una intensidad media  $>70\%$  de la frecuencia cardiaca máxima, que simulan los valores de moderada-alta intensidad alcanzados durante la extinción de incendios forestales reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

#### *4.2.4. Mediciones y cálculos*

Durante la prueba máxima se monitorizó la respuesta ECG (Medisoft MedCard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium) de los sujetos con el fin de detectar posibles problemas cardiacos. En todas las pruebas se registró igualmente la frecuencia cardiaca (FC) (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) cada 5 s y el intercambio de gases se analizó respiración a respiración (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium). El consumo máximo de oxígeno ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) fue considerado el máximo valor de la media móvil tomada cada 30 s.

Durante las pruebas incrementales se registró continuamente la temperatura gastrointestinal ( $T_{\text{gastro}}$ ) mediante una cápsula (VitalSense, Phillips Respironics, Bend, OR, USA) que los participantes ingirieron 8 h antes del comienzo de la prueba (Wen et al., 2015). La temperatura de la piel ( $T_{\text{piel}}$ ) se registró mediante parches dérmicos (VitalSense, Phillips Respironics, Bend, OR, USA) colocados en tres sitios: en el pecho a la altura del pectoral mayor izquierdo, en la cadera anterior derecha y en el muslo anterior derecho. La temperatura media de la piel se calculó mediante la ecuación 8 (Burton, 1934) modificada, aplicando los coeficientes de área corporal (ISO 9886, 2004):

$$T_{\text{piel}} = 0.61 \times T_{\text{pecho}} + 0.19 \times T_{\text{cadera}} + 0.20 \times T_{\text{muslo}} \quad [8]$$

Con los valores obtenidos de temperatura gastrointestinal y temperatura media de la piel, se calculó la temperatura corporal media ( $T_{\text{cuerpo}}$ ), empleando la ecuación 9 (Bröde et al., 2008):

$$T_{\text{cuerpo}} = 0.8 \times T_{\text{gastro}} + 0.2 \times T_{\text{piel}} \quad [9]$$

Los valores medios de  $T_{\text{gastro}}$  y  $T_{\text{piel}}$  así como los de FC y  $\text{VO}_2$  de los 5 últimos minutos de cada fase de trabajo fueron considerados representativos de toda la fase. La FC y la  $T_{\text{gastro}}$  se utilizaron para calcular índice de estrés fisiológico (PSI) (Tikuisis et al., 2002) (ver Sección 3.2.4 del Estudio 1, pag: 77). Se calculó además, el índice cronotrópico como la pendiente de la relación entre la FC y  $\text{VO}_2$  (Smith et al., 2012).

Tras la finalización de cada fase de trabajo se tomaron muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja, previamente hiperemizada, para medir la

concentración de lactato (Lactate Scout, SensLab, Leipzig, Alemania). Durante los últimos 30 s de cada fase de trabajo se solicitó a los sujetos que indicaran la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) atendiendo a la escala de Borg (6-20) (Borg, 1982), así como la sensación térmica y la percepción de humedad (Havenith y Heus, 2004). Se empleó una escala categórica de 1 a 9, donde 1 y 9 se identificaron con *confortable* y *extremadamente caliente* para analizar la sensación térmica y *seco* y *totalmente empapado* para la sensación de humedad (Havenith y Heus, 2004).

Las escalas subjetivas fueron explicadas y administradas de la misma manera por el mismo investigador. Las escalas subjetivas se colocaron delante del tapiz para que los sujetos tuvieran una referencia visual clara de cada una de ellas.

Para el cálculo de de la sudoración total producida, el sudor retenido en la ropa y la evaporación efectiva del sudor, se aplicó la metodología descrita en la Sección 3.2.4 del Estudio 1 (ver página 78). Del mismo modo, la transferencia de calor y el aislamiento térmico de la ropa se calcularon utilizando el método del balance térmico que se describe en la Sección 3.2.4 del Estudio 1 (ver páginas 78-79). El trabajo mecánico efectivo se determinó mediante la ecuación 10 (Parsons, 2003):

$$W = 0.163 \times M \times V \times (F \times A_D^{-1}) \quad [10]$$

donde  $W$  es el trabajo mecánico efectivo ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $M$  es la masa del sujeto vestido (kg),  $V$  es la velocidad del tapiz ( $m \cdot min^{-1}$ ),  $F$  es la pendiente del tapiz y  $A_D$  es la superficie corporal ( $m^2$ ).

#### 4.2.5. Análisis estadístico

El cálculo del tamaño muestral se determinó mediante un análisis *a priori* de la potencia estadística ( $\alpha < 0.05$ ,  $\beta = 0.2$  de dos colas; potencia = 0.8) realizado con el software G\*Power versión 3.1.9.2 (Universidad de Kiel, Alemania), de modo que se detectara un tamaño del efecto de 0.5 °C en la temperatura gastrointestinal (Smith et al., 1995; Smith y Petruzzello, 1998). El resultado del análisis indicó que un tamaño muestral de 8 resulta suficiente para alcanzar una potencia estadística del 80%.

Los resultados se expresan como media  $\pm$  desviación estándar (*SD*). La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Las variables analizadas a lo largo de cada prueba se compararon empleando un ANOVA de medidas repetidas de dos vías (Traje  $\times$  Tiempo). El análisis *post-hoc* para valores *F* significativos se realizó mediante la corrección de Bonferroni. La asunción de esfericidad fue evaluada por medio de la prueba de Mauchly, cuando esta asunción fue violada se realizó el ajuste del nivel de significación mediante la  $\epsilon$  de Greenhouse-Geisser. El análisis de los datos de sudoración, evaporación, balance térmico, e índice cronotrópico se realizó mediante la prueba *t* de Student para muestras relacionadas. El tamaño del efecto se calculó a través de la  $\eta^2$  parcial al cuadrado ( $\eta_p^2$ ) y la *d* de Cohen. Valores de 0.01, 0.06 y 0.14 o de 0.20, 0.50 y 0.80 fueron considerados pequeños, moderados o grandes para la  $\eta_p^2$  y *d*, respectivamente (Cohen, 1988). La relación entre la FC y  $\text{VO}_2$  se determinó por medio del coeficiente de correlación de Pearson (*r*). Valores de  $p < 0.05$  fueron considerados estadísticamente significativos. El análisis

estadístico se realizó mediante el programa SPSS V.19.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA).

### 4.3. RESULTADOS

El comportamiento del  $VO_2$ , VE, FC y concentración de lactato a lo largo de la prueba llevando el TP y la ropa de deporte fue similar hasta los últimos minutos (Figura 4.1). Únicamente se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los minutos 100 y 120 en el  $VO_2$  ( $d = 1.27, 2.72$ ), VE ( $d = 1.57, 1.76$ ) y FC ( $d = 1.95, 1.29$ ). La concentración de lactato cuando los sujetos llevaron puesto el TP fue significativamente mayor al final de la prueba ( $p < 0.01, d = 2.37$ ).

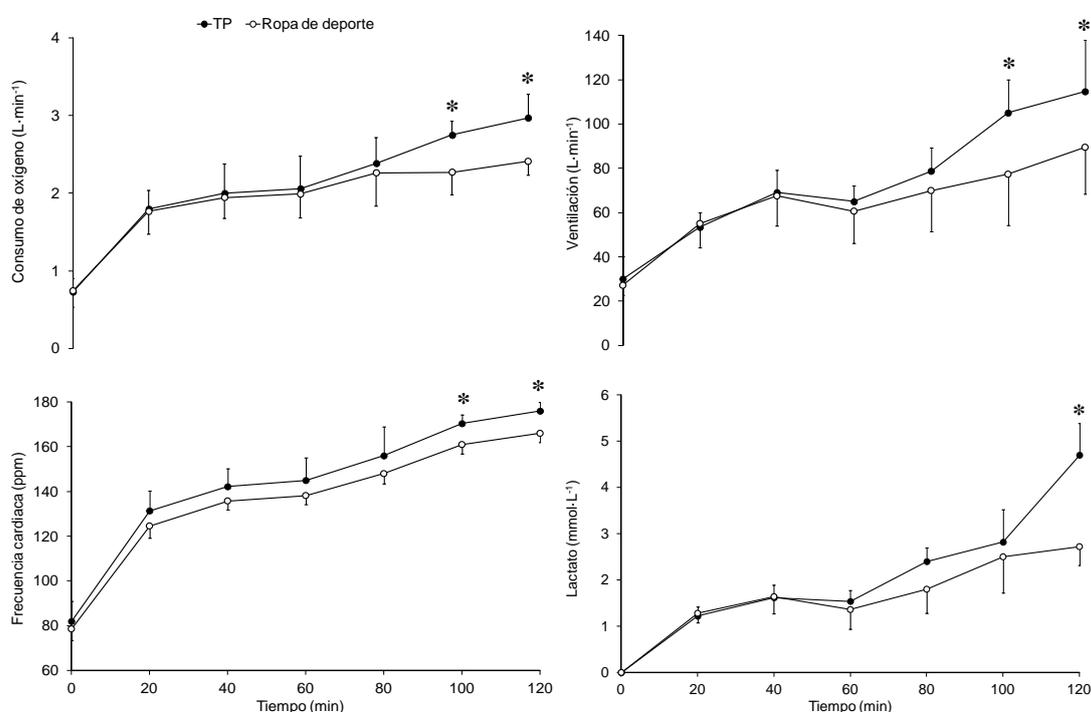


Figura 4.1. Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardíaca y concentración de lactato con el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

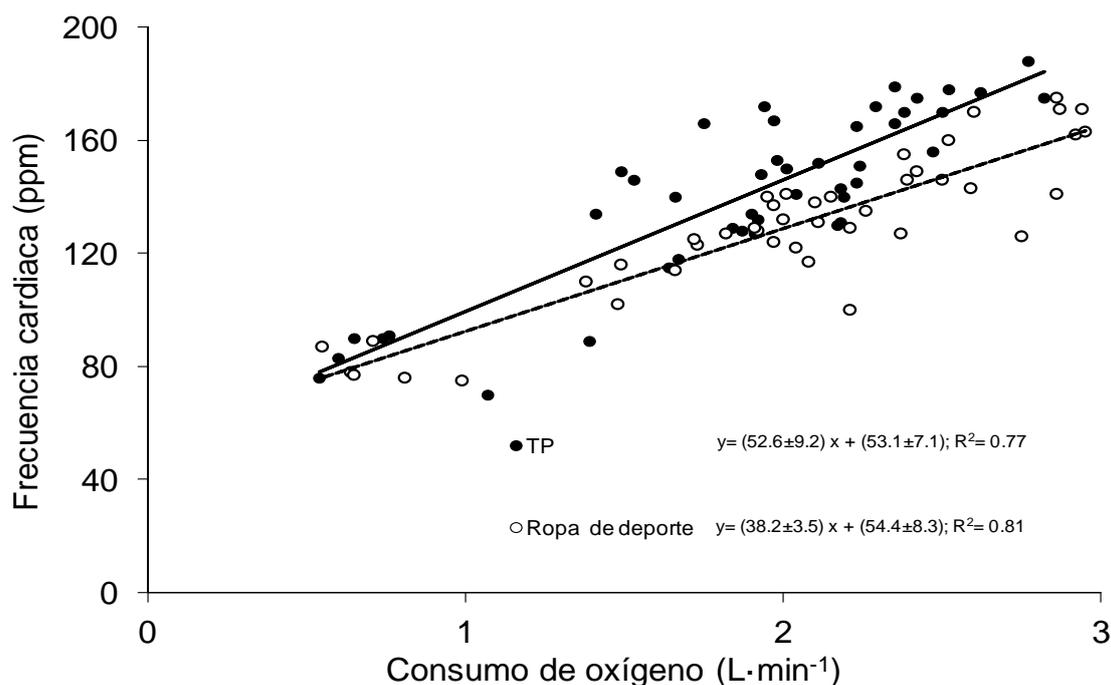


Figura 4.2. Relación entre frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno en la prueba en traje de protección (TP) (línea sólida) y en ropa de deporte (línea discontinua).

La relación entre el  $VO_2$  y la FC en las pruebas realizadas se muestra en la *Figura 4.2*. Se obtuvo una correlación ( $p < 0.001$ ) de  $r = 0.87$  y  $0.90$  cuando los sujetos llevaron el TP y la ropa deportiva, respectivamente. El Índice Cronotrópico obtenido fue mayor ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.27$ ) cuando se llevó el TP ( $52.6 \pm 9.2$  vs.  $38.2 \pm 3.5$  pulsaciones  $\cdot L^{-1}$ ).

Globalmente, tanto la  $T_{gastro}$  como  $T_{piel}$  fueron significativamente más altas ( $p < 0.05$ ) cuando los sujetos realizaron la prueba con el TP ( $38.0 \pm 0.4$  vs.  $37.7 \pm 0.3$  °C,  $\eta_p^2 = 0.82$  y  $35.2 \pm 0.3$  vs.  $33.8 \pm 0.6$ ,  $\eta_p^2 = 0.77$ , respectivamente). Se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la  $T_{gastro}$  en los minutos 60 ( $d = 1.17$ ) y 80 ( $d = 1.77$ ) (*Figura 4.3*). La  $T_{piel}$  fue significativamente más elevada en la prueba realizada con el TP en los minutos 20 ( $p < 0.01$ ,  $d = 1.45$ ), 40 ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.49$ ), 100 ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.86$ ) y 120 ( $p < 0.01$ ,  $d = 5.42$ ) (*Figura 4.3*).

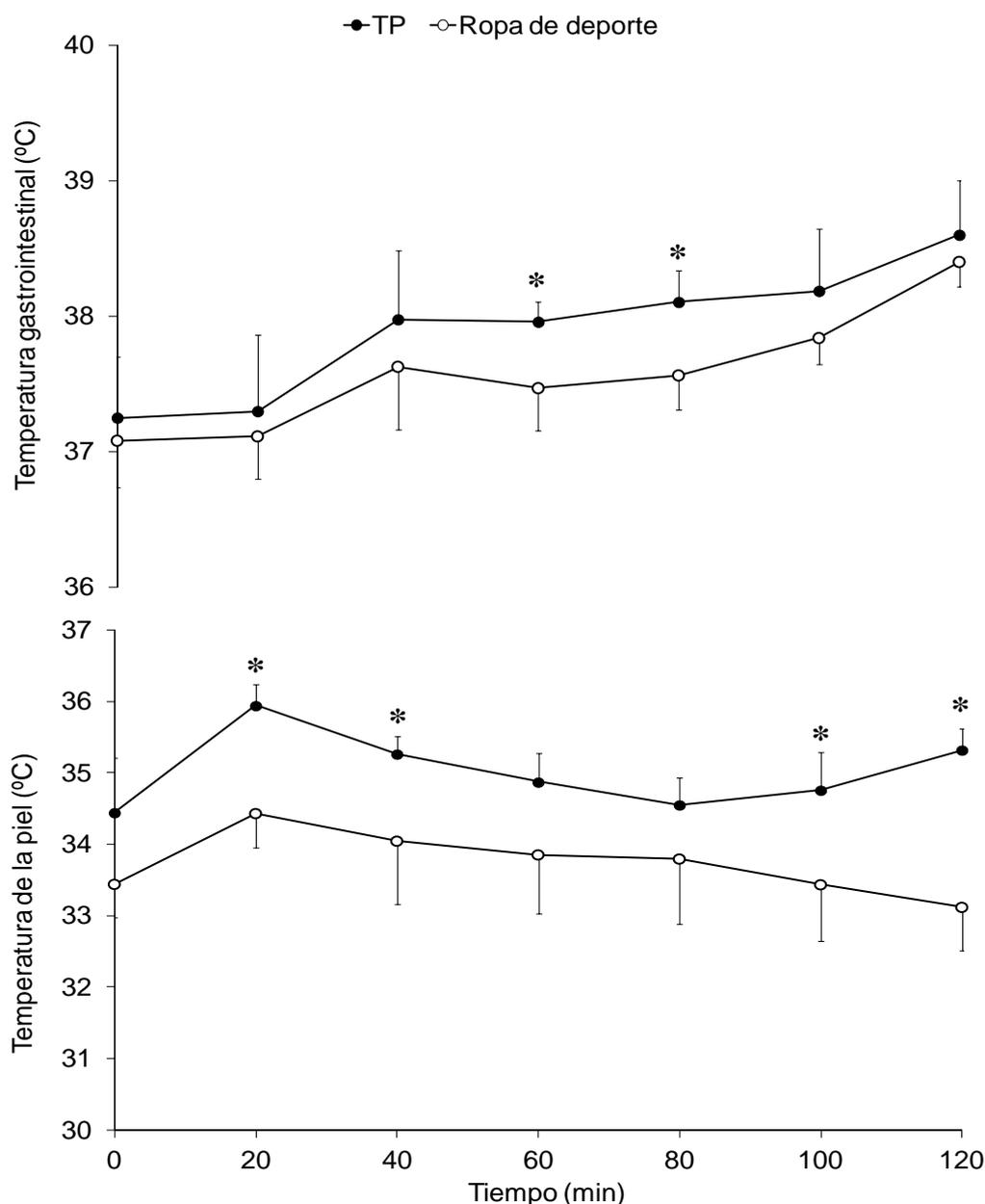


Figura 4.3. Comportamiento de la temperatura gastrointestinal y de la temperatura media de la piel en el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

El PSI medio analizado en las pruebas fue similar ( $5.2 \pm 2.0$  y  $4.7 \pm 1.5$  con TP y ropa deportiva, respectivamente;  $\eta_p^2 = 0.29$ ). Sin embargo, los valores obtenidos al final de prueba fueron significativamente mayores ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.55$ ) cuando se utilizó el TP (Figura 4.4). El índice de estrés fisiológico medio de la

prueba se clasificó como moderado, pasando a ser alto-muy alto al final de la misma.

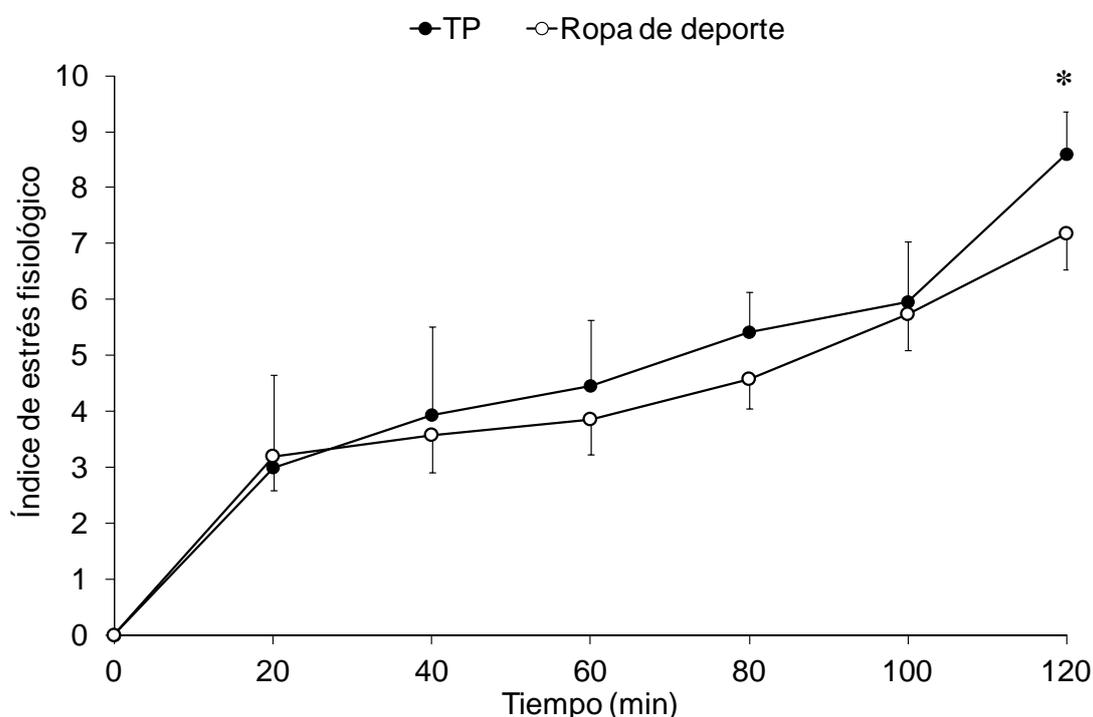


Figura 4.4. Comportamiento de PSI en el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

La RPE (*Figura 4.5*) fue similar entre configuraciones a lo largo de la prueba ( $\eta_p^2 = 0.40$ ). Se halló un comportamiento significativo ( $p < 0.05$ ,  $\eta_p^2 = 0.74$ ) en la sensación térmica de los sujetos en función de la condición analizada ( $5.2 \pm 0.4$  vs.  $5.0 \pm 0.7$  llevando el TP y la ropa deportiva, respectivamente). La sensación de humedad fue significativamente más elevada ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.64$ ) al final de la prueba cuando se utilizó el TP (*Figura 4.5*). Todas las variables de percepción subjetiva (*i.e.*, RPE, sensación térmica y percepción de humedad) y las variables termofisiológicas analizadas (*i.e.*,  $VO_2$ , VE, FC, concentración de lactato,  $T_{gastro}$ ,  $T_{piel}$  y PSI), se incrementaron significativamente en función del tiempo de prueba ( $p < 0.05-0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.62-0.98$ ).

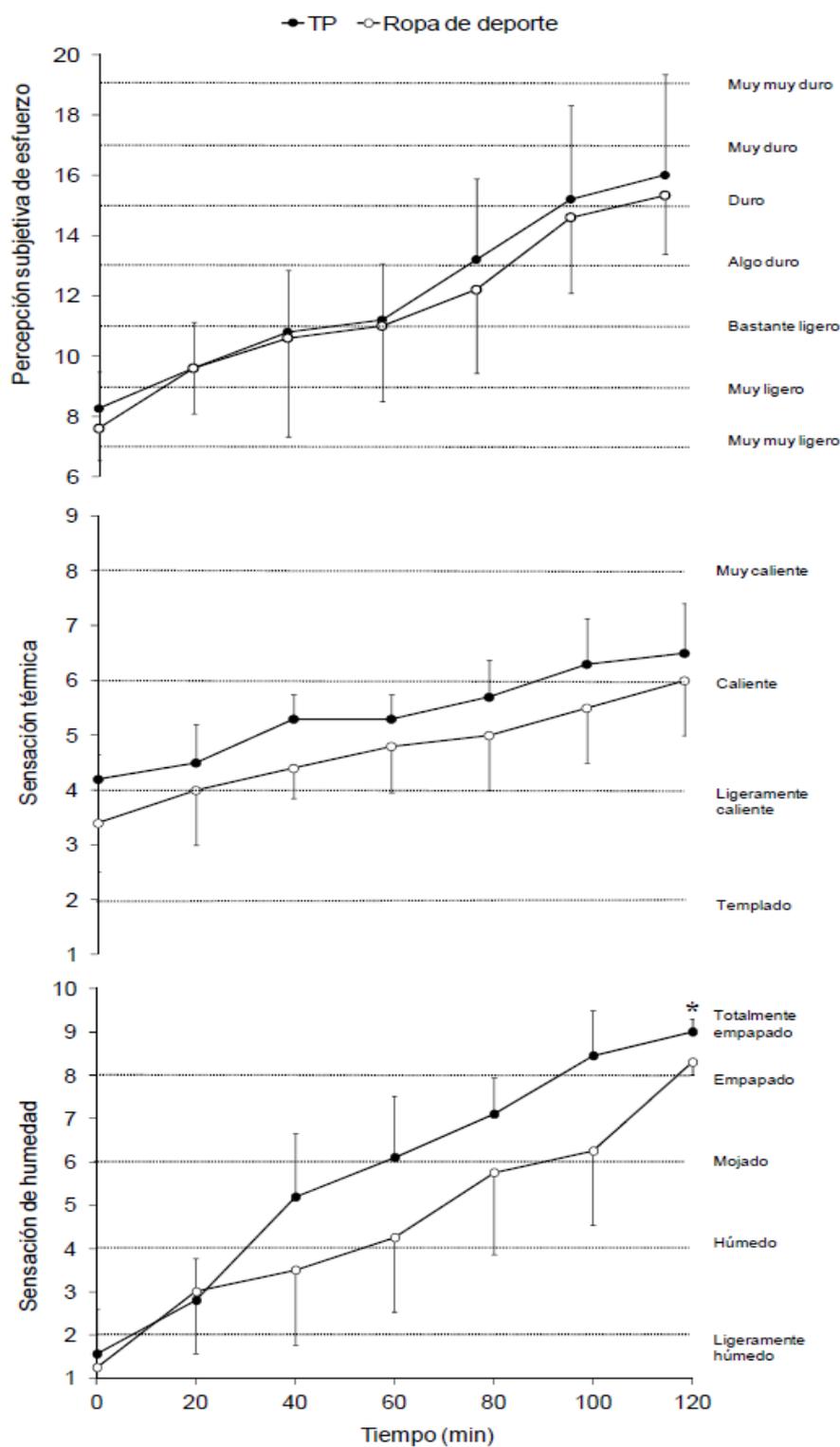


Figura 4.5. Comportamiento de la RPE, la sensación térmica y la sensación de humedad en el traje de protección (TP) y en ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

No se han encontrado diferencias significativas al comparar la sudoración total ( $d=0.57$ ) ni la tasa de sudoración ( $d=0.47$ ) entre configuraciones (Figura 4.6).

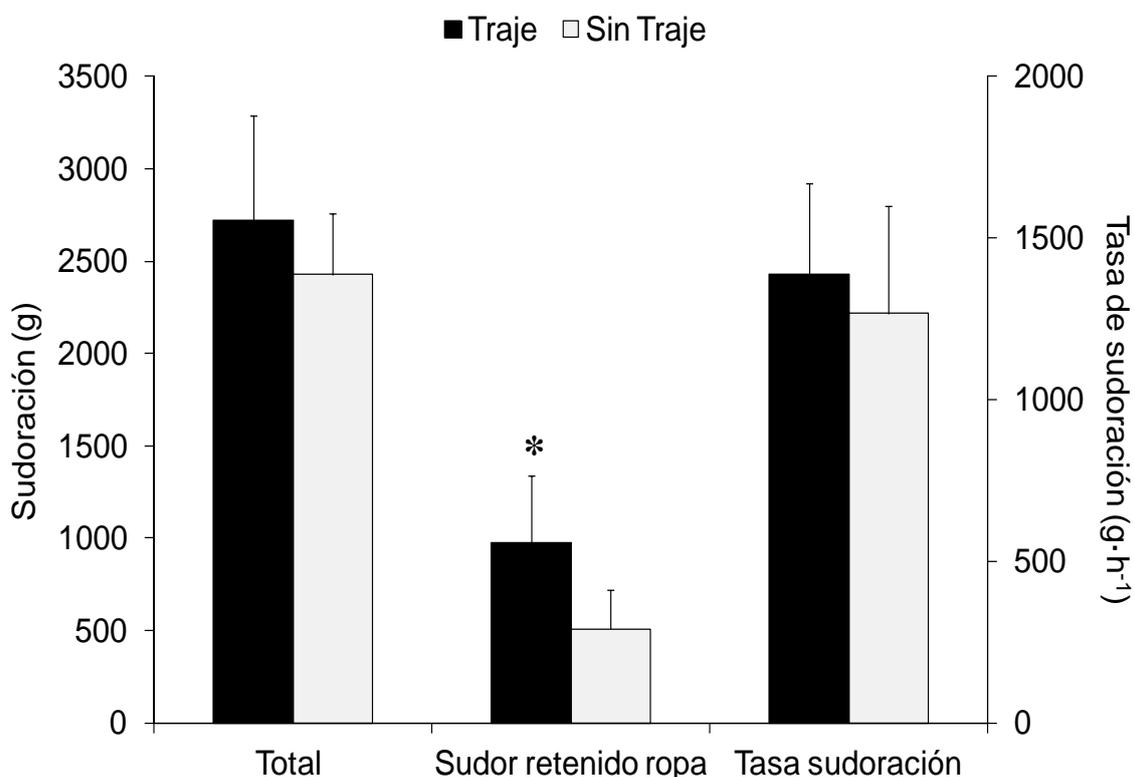


Figura 4.6. Sudoración total, sudor retenido en la ropa y tasa de sudoración (excluidas las zapatillas) con el traje de protección (TP) o ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p<0.05$ ).

Por el contrario, la cantidad de sudor retenido en el TP fue significativamente mayor ( $p<0.05$ ,  $d=1.61$ ) a la retenida en la ropa deportiva, por lo que, consecuentemente, la eficiencia evaporativa fue mayor ( $p<0.001$ ,  $d=1.64$ ) cuando los sujetos llevaron puesta la ropa deportiva (Figura 4.7).

Por último, los parámetros estimados del balance térmico son mostrados en la Tabla 4.2, en la que no se aprecian diferencias significativas en las variables analizadas ( $d=0.32-1.32$ ).

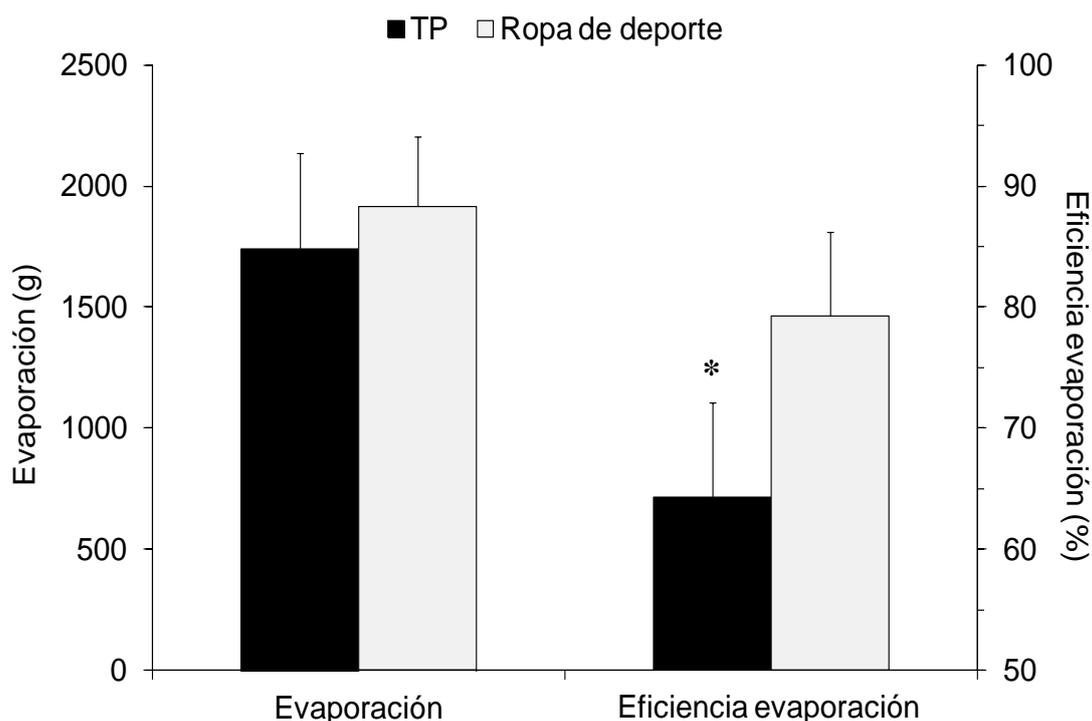


Figura 4.7. Evaporación y eficiencia de la evaporación con el traje de protección (TP) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Tabla 4.2. Parámetros del balance térmico (media  $\pm$  SD).

	TP	Ropa de deporte	d
Almacenamiento de calor ( $W \cdot m^{-2}$ )	31.8 $\pm$ 13.1	19.0 $\pm$ 9.1	0.96
Producción neta de calor metabólico ( $W \cdot m^{-2}$ )	365.3 $\pm$ 80.6	304.8 $\pm$ 33.1	0.83
Intercambio de calor por respiración ( $W \cdot m^{-2}$ )	15.0 $\pm$ 1.5	16.6 $\pm$ 2.3	0.82
Evaporación ( $W \cdot m^{-2}$ )	310.0 $\pm$ 88.5	338.5 $\pm$ 30.4	0.36
Intercambio de calor seco ( $W \cdot m^{-2}$ )	39.7 $\pm$ 32.0	71.7 $\pm$ 10.0	1.32
Aislamiento térmico ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	0.20 $\pm$ 0.17	0.08 $\pm$ 0.04	1.04

TP, traje de protección. d, tamaño del efecto de Cohen.

#### 4.4. DISCUSIÓN

El principal hallazgo de este estudio fue que el traje analizado supone una reducción de la eficiencia evaporativa, una mayor temperatura corporal, así como mayor temperatura de la piel y mayor sensación térmica.

La  $T_{\text{gastro}}$  aumentó de modo constante en ambas condiciones, lo que refleja una situación de estrés térmico incompensable (Den Hartog et al., 2016). La realización de trabajo físico intenso generó una alta tasa de calor metabólico ( $\sim 380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) que supuso que no se pudiera mantener el equilibrio térmico independientemente del tipo de ropa o de las condiciones ambientales (McLellan y Selkirk, 2004). Sin embargo, la temperatura gastrointestinal y la de la piel fueron significativamente mayores en la prueba con traje, lo que indica el papel restrictivo de la ropa de protección en el balance térmico, en línea con los resultados obtenidos por otros trabajos al analizar el EPI en bomberos de estructuras (Smith et al., 1995; Fogarty et al., 2004; Bruce-Low et al., 2007) o al comparar un traje ignífugo ligero similar al estudiado (Kofler et al., 2015).

En la prueba con traje, los valores finales de temperatura gastrointestinal están por debajo del umbral de la hipertermia ( $39.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), que se ha considerado como el principal factor limitante del rendimiento cardiovascular en calor (González-Alonso et al., 1999). A pesar de esto, al final del test la FC y el  $\text{VO}_2$  se incrementaron un 5% y un 22%, respecto a la configuración en ropa deportiva.

En la literatura se han establecido el peso del Equipo de Protección Individual (EPI) y la disminución de la economía del movimiento como los principales factores asociados al aumento observado del  $\text{VO}_2$  ( $\sim 20\text{-}30\%$ ), en bomberos de estructura (Smith et al., 1995; Dreger et al., 2006; Taylor et al., 2012). Dorman y Havenith (2009) establecieron que por cada kg de peso añadido se incrementa un 2.7% el  $\text{VO}_2$ , por lo que la diferencia de peso entre las condiciones analizadas ( $\sim 1.5 \text{ kg}$ ) no resultaría suficiente para explicar el incremento del  $\text{VO}_2$  observado en este estudio.

Varios estudios han relacionado el uso de ropa de protección con el incremento de la carga cardiovascular (Sköldström, 1987; Bruce-Low et al., 2007; Smith et al., 2012). La restricción en la disipación del calor que supone el uso de ropa de protección obliga a aumentar el flujo sanguíneo periférico para mejorar la eficiencia termorregulatoria (Smith et al., 2012) que reduce el gasto cardiaco disponible para el metabolismo muscular y supone que los sujetos trabajen a un mayor %VO<sub>2max</sub> y una mayor FC (Ely et al., 2010). Los sujetos que llevan el traje alcanzan el umbral aeróbico (64% VO<sub>2max</sub>; 75% FC máxima teórica) ~20 minutos antes que en la prueba sin traje, en la que se alcanza este umbral al final de la misma. Este adelanto en la aparición del umbral aeróbico supone una reducción del rendimiento del ~17% respecto a la condición en ropa deportiva y resulta superior al ~10% observado en otros estudios en los que se analizó la respuesta fisiológica en ropa de protección (Fogarty et al., 2004; Kofler et al., 2015).

Nuestros resultados muestran un incremento significativo del flujo sanguíneo periférico en la prueba con traje, como constata la mayor temperatura media de la piel  $35.2 \pm 0.3$  °C frente a los  $33.8 \pm 0.6$  °C en la prueba control.

Por otro lado, en los dos últimos estadios de prueba, la alta intensidad del ejercicio (67% VO<sub>2max</sub> y 90% FC<sub>max</sub>) produjo un mayor incremento de la T<sub>piel</sub>, que limitó el gradiente T<sub>gastro</sub>-T<sub>piel</sub> (Traje= 2.6 °C vs. Sin Traje= 3.6 °C), que ponen de relieve los efectos termorregulatorios sobre la carga cardiovascular y aeróbica observada. El aumento del flujo sanguíneo periférico produce el incremento de la temperatura de la piel (Ely et al., 2010), por lo que el rendimiento aeróbico durante el ejercicio submáximo en calor se ha relacionado

con la temperatura de la piel y, más concretamente, con el gradiente temperatura central-temperatura de la piel (Cheuvront et al., 2010). Una temperatura media de la piel superior a 35 °C supone un incremento significativo del flujo sanguíneo periférico que afecta al rendimiento aeróbico en ausencia de deshidratación (Ely et al., 2010; Cuddy et al., 2014), por lo que una elevada temperatura central *per se* no resulta suficiente para producir una disminución de la eficiencia aeróbica (Ely et al., 2010; Sawka et al., 2015).

Smith et al. (2012) plantearon que la restricción termorregulatoria que provoca el EPI podría modificar la relación entre FC y VO<sub>2</sub> (Índice Cronotrópico). Para contrastarlo realizaron pruebas incrementales hasta el agotamiento (~12 min) en condiciones termoneutras (21 °C y 50% HR), comparando la respuesta del VO<sub>2</sub> y la FC con el EPI completo de bomberos de estructura frente a una configuración en ropa deportiva con un peso equivalente al EPI analizado. A diferencia de los resultados obtenidos por Smith et al. (2012), nuestros datos reflejan un incremento significativo del Índice Cronotrópico entre condiciones (Traje= 52.6 ± 9.2 latidos·L<sup>-1</sup> vs. Sin Traje= 38.2 ± 3.5 latidos·L<sup>-1</sup>) (p= 0.027, d= 1.27) (Figura 4.2) lo que refleja la carga que la termorregulación impone sobre el sistema cardiovascular al llevar el traje ignífugo.

A pesar del mayor aislamiento térmico que supone el EPI de bomberos de estructura (~0.47 m<sup>2</sup>·K·W<sup>-1</sup>) (Holmér et al., 2006) respecto al traje analizado (~0.23 m<sup>2</sup>·K·W<sup>-1</sup>) (Raimundo y Figueiredo, 2009), en el estudio de Smith et al. (2012) no se encontró una repercusión significativa en el Índice Cronotrópico. Este resultado podría estar relacionado con la corta duración del protocolo experimental (~12 min) frente al de este estudio (120 min) ya que se ha descrito

que son necesarias pruebas de larga duración (i.e. 45 min) para que los efectos termorregulatorios puedan ser observados (Levine et al., 1998). Kofler et al., (2015) compararon la respuesta termofisiológica de un traje de trabajo de características similares al analizado en este estudio, respecto a la condición con ropa de deporte. En esas condiciones no se encontraron diferencias significativas en la frecuencia cardiaca con valores finales  $\sim 190$  ppm en ambas condiciones. Sin embargo se hallaron diferencias significativas, en el incremento de la temperatura timpánica ( $1.4 \pm 0.4$  vs.  $0.7 \pm 0.3$  °C) y de la piel ( $2.6 \pm 0.4$  vs.  $1.6 \pm 0.8$  °C). La mayor intensidad de trabajo ( $\sim 540$  W·m<sup>-2</sup>) y el haber implementado ropa interior ignífuga que aumentó el aislamiento térmico, resultó decisivo para que en un tiempo sustancialmente menor (34 min) se alcancen incrementos de la temperatura central y de la piel significativamente mayores a los obtenidos en este estudio.

El comportamiento del PSI no difirió entre condiciones a pesar de que la temperatura central fue significativamente mayor en Traje. El valor medio en ambas condiciones (Traje= 5.2 vs. Sin Traje= 4.7) cataloga el estrés fisiológico como "moderado" en línea con el valor de PSI analizado en incendios forestales ( $\sim 4.4$ ) (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). Petruzzello et al., (2009) describieron un mayor PSI al comparar diferentes configuraciones de EPI de bomberos de estructura (PSI  $\sim 6$ ) respecto a la configuración control (PSI  $\sim 3$ ) en pruebas de intensidad moderada ( $3.5$  km·h<sup>-1</sup> y 10% de pendiente) y corta duración ( $\sim 15$  min). Sin embargo los valores de PSI finales alcanzados en este estudio (PSI  $\sim 7-8$ ) resultan similares a los descritos por Petruzzello et al. (2009), lo que resalta la carga fisiológica que suponen las condiciones de nuestro estudio en los estadios finales del test. Que no se hayan encontrado diferencias entre

condiciones, indicaría el mayor peso relativo que sobre el PSI tiene, en las condiciones de este estudio, la carga cardiovascular frente a la carga térmica. Este resultado es consistente con lo observado por Tikuisis et al., (2002) al analizar la respuesta fisiológica llevando un traje militar semipermeable en condiciones de estrés térmico incompensable (40 °C, 30% HR).

Se ha relacionado una mayor temperatura de la piel con una mayor sensación de esfuerzo y sensación térmica, cuando se realiza trabajo físico a una intensidad preestablecida (Schlader et al., 2011). Nuestros resultados muestran que el TP induce una mayor sensación térmica relacionada con la mayor temperatura de la piel analizada. Sin embargo no se han encontrado diferencias en la RPE entre condiciones. La alta intensidad del ejercicio podría haber limitado la capacidad de los sujetos para diferenciar la RPE, en línea con los resultados obtenidos en el PSI y con otros estudios donde se comparó la respuesta subjetiva en función de la ropa de protección a una alta intensidad de ejercicio (Fogarty et al., 2004; Kofler et al., 2015).

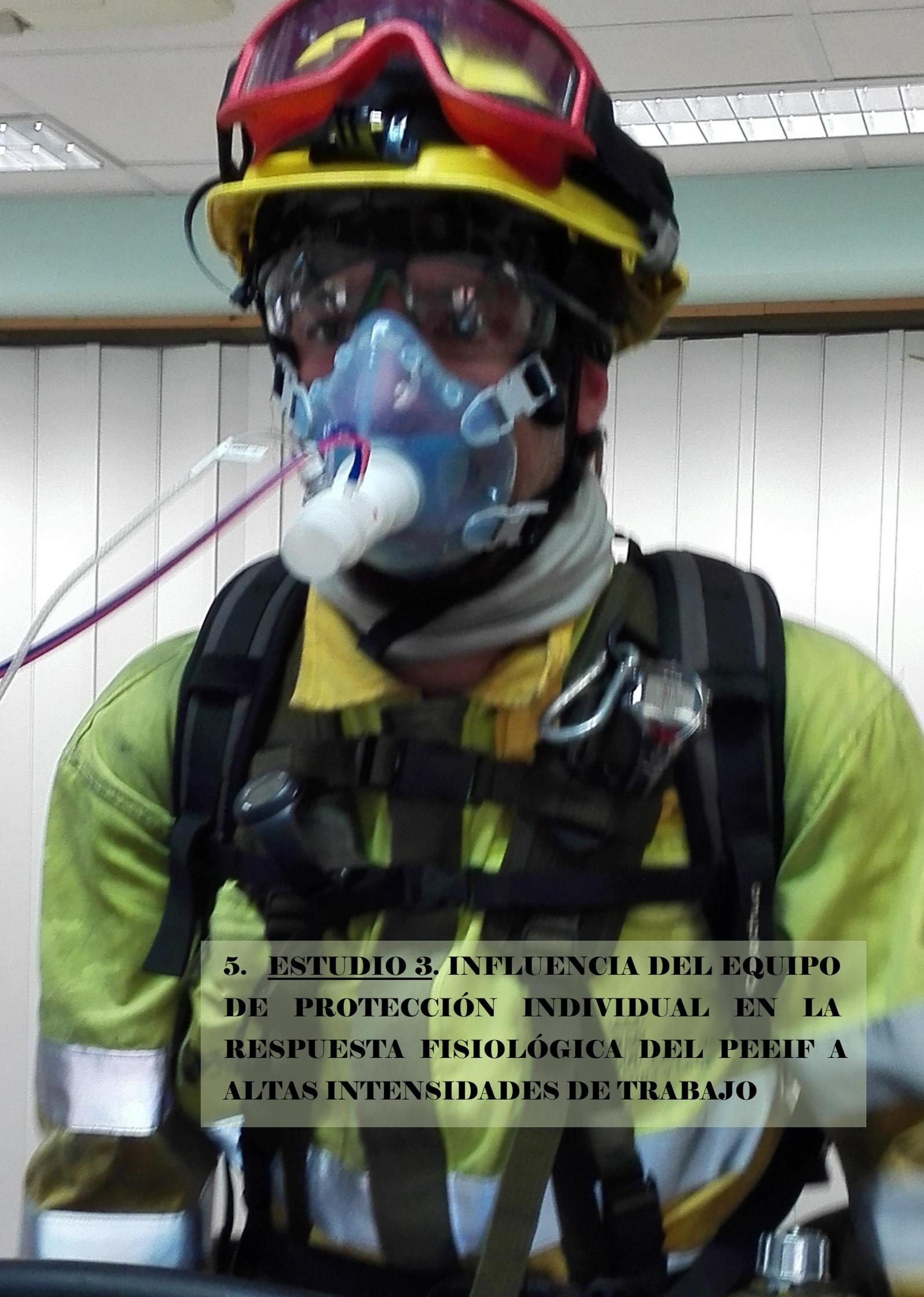
La mayor temperatura media de la piel (~1.4 °C) en el TP sugiere una disminución en la transferencia del calor respecto a la prueba en ropa de deporte (Kwon et al., 1998; Guo et al., 2008). Esta afirmación se ve respaldada por los resultados obtenidos de sudoración (*Figura 4.6*) y balance térmico (*Tabla 4.2*). El TP redujo la evaporación efectiva del sudor un 15%, mientras que la transferencia de calor seco estimada se redujo un 35% (*Tabla 4.2*). La menor evaporación y transferencia de calor seco suponen una mayor temperatura gastrointestinal y un mayor almacenamiento de calor, en línea con las observaciones de otros estudios (Kofler et al., 2015; Den Hartog et al., 2016).

Kofler et al. (2015) constataron una reducción del 21% en la evaporación, lo que incrementó significativamente el almacenamiento de calor de  $55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Den Hartog et al. (2016) analizaron una eficiencia evaporativa promedio del 76% para los EPIs forestales analizados, que resulta significativamente mayor al 64% de efectividad evaporativa alcanzada en nuestro estudio. Esta diferencia podría estar relacionada con la ausencia de fibras hidrófilas (*i.e.*, algodón o viscosa) en la composición de los trajes en el estudio de Den Hartog et al. (2016) frente al alto porcentaje de viscosa (65%) del TP analizado en este estudio, ya que se ha demostrado que los materiales hidrófilos poseen una alta capacidad de retención de la humedad que limita su evaporación (Kwon et al., 1998). Por otro lado, la reducción en la evaporación se ha relacionado con el incremento de la humedad interior y con una mayor sensación de humedad percibida (Guo et al., 2008). Los datos analizados no muestran diferencias entre configuraciones en la sensación de humedad excepto al final de prueba, lo que indicaría el efecto acumulativo de la humedad retenida en la percepción subjetiva (Guo et al., 2008).

La extinción de incendios forestales se caracteriza por la exposición a focos de calor radiante y convectivo provenientes de las llamas (Raimundo y Figueiredo, 2009). La humedad acumulada en la ropa incrementa la conductividad y la capacidad térmica de los tejidos, por lo que en este contexto aumentaría el riesgo de sufrir quemaduras por escaldadura (Lawson et al., 2004; Keiser y Rossi, 2008). En nuestro estudio se ha constatado que tras dos horas de prueba el TP retiene un 48% más de sudor respecto a la ropa deportiva, pudiendo observarse la saturación del tejido especialmente a partir de la segunda mitad de la prueba (min 60-120). Por ello, el manejo de la humedad en términos de

eficiencia evaporativa y la transferencia de calor seco son características importantes que determinan el comportamiento termorregulatorio de los tejidos que deben ser tenidos en cuenta a la hora de seleccionar la ropa protección, ya que puede condicionar la seguridad de los sujetos (Kwon et al., 1998; Havenith y Heus, 2004).





**5. ESTUDIO 3. INFLUENCIA DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL PEEIF A ALTAS INTENSIDADES DE TRABAJO**



## 5.1. INTRODUCCIÓN

La ropa de protección personal tiene especial relevancia en la seguridad de diversas profesiones. Ésta actúa como una capa aislante ante el ambiente externo, protegiendo al trabajador de una amplia variedad de peligros (Nayak et al., 2014). Sin embargo, su uso puede incrementar la respuesta fisiológica del organismo reduciendo el rendimiento de los trabajadores, tanto a nivel físico como cognitivo (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Selkirk y McLellan, 2004; Caldwell et al., 2011; Kofler et al., 2015). Por ello, en los últimos años un gran número de estudios han analizado la influencia que tiene este tipo de ropa en diversas profesiones, como en bomberos de estructuras (Baker et al., 2000; Fogarty et al., 2004, Bruce-Low et al., 2007; Fontana et al., 2016), en personal sanitario (Dorman y Havenith, 2009; Wen et al., 2015) o en militares (Montain et al., 1994; Caldwell et al., 2011).

En algunas profesiones la utilización de este tipo de ropa de protección suele complementarse con el uso de diversos elementos. Por ejemplo, en el caso de los bomberos de estructura se complementarían con el casco, las botas, los

guantes y el equipo de respiración autónoma (Selkirk y McLellan, 2004). Todos estos elementos junto con la ropa de protección formarían su equipo de protección individual (EPI).

La mayoría de los estudios han valorado en su conjunto la repercusión que tiene en el EPI sobre el organismo de los bomberos (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Selkirk y McLellan, 2004, Dreger et al., 2006; Bruce-Low et al., 2007; Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014). Sin embargo, son pocos los trabajos que han analizado el efecto termofisiológico que tiene cada uno de los elementos del EPI (Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014). Recientemente, se ha informado de la importancia que tienen estos componentes en el incremento del estrés metabólico y térmico de los bomberos, pudiendo incluso ser mayor al supuesto por el uso de la ropa de protección (Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014).

El impacto fisiológico que tiene la ropa de protección o el EPI utilizado por el PEEIF ha sido menos estudiado. Hasta donde llega nuestro conocimiento, sólo dos estudios han analizado el efecto que tienen diferentes trajes de protección en bomberos forestales (Budd et al. 1997; Den Hartog et al. 2016). Estudios iniciales de Budd et al. (1997) compararon la respuesta termofisiológica de los bomberos al usar dos trajes con diferente aislamiento térmico. Recientemente, Den Hartog et al. (2016) compararon las repercusiones fisiológicas que tuvieron diferentes monos de protección según los tejidos utilizados en su fabricación y la construcción de los mismos. Sin embargo hasta la fecha, ningún trabajo ha analizado la contribución que tiene en su conjunto el EPI de los bomberos forestales en el incremento del estrés fisiológico y térmico

durante la realización de ejercicio. Por ello, el objetivo del presente estudio fue analizar en condiciones ambientales cálidas, el efecto que tiene el EPI usado por el PEEIF sobre su respuesta fisiológica y subjetiva ante la realización de un ejercicio físico moderado-intenso.

## 5.2. METODOLOGÍA

### 5.2.1. Sujetos

En el estudio participaron 8 PEEIF físicamente activos. Todos los sujetos realizaban ejercicio aeróbico tres veces por semana (45-60 min por sesión de entrenamiento). Las características de los sujetos se muestra en la *Tabla 5.1*. Previa a su participación en el estudio todos los sujetos fueron informados de los procedimientos a realizar y de los riesgos del estudio. Así mismo, se obtuvo su consentimiento informado. El estudio fue desarrollado de acuerdo con las directrices de la Conferencia de Helsinki.

**Tabla 5.1. Características de los participantes (n=8).**

	Media $\pm$ SD
Edad (años)	30.8 $\pm$ 8.4
Peso (kg)	76.9 $\pm$ 10.9
Talla (m)	1.8 $\pm$ 0.1
Masa grasa <sup>A</sup> (%)	14.0 $\pm$ 3.0
A <sub>D</sub> (m <sup>2</sup> )	1.9 $\pm$ 0.2
IMC (kg·m <sup>-2</sup> )	22.9 $\pm$ 1.5
VO <sub>2max</sub> (L·min <sup>-1</sup> )	3.93 $\pm$ 0.44

IMC: Índice de masa corporal. <sup>A</sup> Determinado mediante bioimpedanciometría tetrapolar. VO<sub>2max</sub>: consumo máximo de oxígeno. A<sub>D</sub>: área corporal calculada según la ecuación de DuBois y DuBois.

### *5.2.2. Diseño experimental*

Cada sujeto realizó tres pruebas en días diferentes, separadas al menos por 48 h. Se recomendó a los sujetos que no realizaran ejercicio físico intenso durante la realización del estudio, así como que llevaran una dieta rica en hidratos de carbono el día previo a la realización de las pruebas.

El primer test consistió en realizar una prueba de esfuerzo hasta el agotamiento para determinar la capacidad aeróbica de los sujetos (Bruce, 1971). En la segunda y tercera sesión los sujetos realizaron, de manera contrabalanceada, un test incremental de 120 minutos llevando puesta la ropa deportiva (*i.e.*, pantalones cortos, camiseta de algodón, ropa interior, calcetines de algodón y zapatillas deportivas) o el EPI.

El EPI empleado en este estudio estuvo compuesto por un mono ignífugo de una pieza con una composición: 65% viscosa ignífuga, 30% NOMEX® y 5% KEVLAR®, un gramaje de  $270 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , un peso de 1460 g, una resistencia térmica de  $0.019 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  y una resistencia evaporativa de  $3.79 \text{ m}^2\cdot\text{Pa}\cdot\text{W}^{-1}$ . A la ropa de protección se le añadió el casco, los guantes, las botas de extinción de media caña, las gafas, el cubrecuellos y el cinturón de extinción.

El peso total del EPI completo fue de 6.3 kg. La ropa que los sujetos llevaron debajo del mono de protección fue estandarizada: camiseta de algodón de manga corta, ropa interior de algodón y calcetines cortos de algodón.

Durante todas las pruebas los sujetos llevaron una mochila de 20 kg para simular el peso de la mochila extintora que utilizan habitualmente en la extinción de incendios (Rodríguez-Marroyo et al., 2011).

### *5.2.3. Protocolo experimental*

Todas las pruebas se realizaron sobre un tapiz rodante (h/p/cosmos pulsar, h/p/cosmos sports & medical GMBH, Nussdorf-Traunstein, Germany). Antes de cada prueba se realizó un calentamiento estandarizado de 10 min corriendo a  $8-10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $\sim 60\% \text{ FC}_{\text{max}}$ ), después de los cuales los sujetos realizaron ejercicios de estiramiento durante 5 min.

La prueba de esfuerzo se realizó siguiendo la metodología descrita por Bruce (1971). La velocidad y pendiente inicial del test fue de  $2.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  y 10%, respectivamente. La velocidad y pendiente se incrementaron cada 3 min hasta la extenuación volitiva de los sujetos.

Las pruebas incrementales de 120 min se realizaron a la misma hora del día (por la mañana, entre las 12:00 y las 16:00 h.). Las condiciones ambientales del laboratorio fueron estandarizadas, de forma que la temperatura ambiental y la humedad relativa se mantuvieron a  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y 30%, respectivamente, simulando las condiciones analizadas en fuegos reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

Durante los 120 min de esfuerzo los sujetos caminaron a  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  y la pendiente fue incrementándose paulatinamente: 1, 2, 5, 8, 10 y 13% en cada fase de trabajo. La duración de la primera fase de trabajo fue de 20 min mientras que la de las siguientes fue de 15 min. Entre cada fase de ejercicio se realizó un descanso pasivo de 5 min, el cual se aprovechó para suministrar  $0.15 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$  de agua, a una temperatura de  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , por cada minuto de trabajo (Montain et al., 1994; Selkirk y McLellan, 2004). Este procedimiento fue adoptado para evitar

que la deshidratación limitara la tasa de sudoración (González-Alonso et al., 1999; Cheuvront et al., 2010).

La prueba se dio por concluida antes de los 120 min si los sujetos alcanzaron alguno de los siguientes criterios: *i*) temperatura gastrointestinal  $\geq 39.5$  °C; *ii*) alcanzar el 95% de la frecuencia máxima durante 2 min; *iii*) tener una percepción subjetiva de esfuerzo (RPE)  $\geq 19$ ; *iv*) sentir náuseas, mareos y malestar general; *v*) expresar su deseo de cesar la prueba.

El protocolo diseñado fue similar al utilizado en estudios previos (Selkirk y McLellan, 2004). La velocidad y pendientes seleccionadas permitieron que los sujetos alcanzasen una intensidad media  $>70\%$  de la frecuencia cardiaca máxima, la cual simula los valores de moderada-alta intensidad alcanzados durante la extinción de incendios forestales reales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

#### *5.2.4. Mediciones y cálculos*

Durante la prueba máxima se monitorizó la respuesta ECG (Medisoft Medcard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium) de los sujetos con el fin de detectar posibles problemas cardiacos. En todas las pruebas se registró la frecuencia cardiaca (FC) (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) cada 5 s y el intercambio de gases respiración a respiración (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium). El consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ) fue considerado el máximo valor de la media móvil tomada cada 30 s.

Durante las pruebas incrementales de 120 min se registró continuamente la temperatura gastrointestinal ( $T_{gastro}$ ) mediante una cápsula (VitalSense, Phillips

Respironics, Bend, OR, USA) que los participantes ingirieron entre 6-8 h antes del comienzo de la prueba (Wen et al., 2015). La temperatura de la piel ( $T_{piel}$ ) se registró mediante parches dérmicos (VitalSense, Phillips Respironics, Bend, OR, USA) colocados en tres sitios: en el pecho a la altura del pectoral mayor izquierdo, en la cadera anterior derecha y en el muslo anterior derecho. La temperatura media de la piel se calculó mediante la fórmula de Burton (1934) modificada, aplicando los coeficientes de área corporal de ISO 9886 (2004) según la ecuación 11:

$$T_{piel} = 0.61 \times T_{pecho} + 0.19 \times T_{cadera} + 0.20 \times T_{muslo} \quad [11]$$

Con los valores obtenidos de  $T_{gastro}$  y  $T_{piel}$ , se calculó la temperatura corporal media ( $T_{cuerpo}$ ), empleando la ecuación 12 (Bröde et al., 2008):

$$T_{cuerpo} = 0.8 \times T_{gastro} + 0.2 \times T_{piel} \quad [12]$$

Los valores medios de  $T_{gastro}$  y  $T_{piel}$  así como los de FC y  $VO_2$  de los 5 últimos minutos de cada fase de trabajo fueron considerados representativos de toda la fase. La FC y  $T_{gastro}$  se utilizaron para calcular el índice de estrés fisiológico (PSI) (Tikusis et al., 2002) (ver Sección 3.2.4 Estudio 1, página: 77). Además, se calculó el índice cronotrópico como la pendiente de la relación entre la FC y  $VO_2$  (Smith et al., 2012).

Tras la finalización de cada fase de trabajo se tomaron muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja, previamente hiperemizada, para medir la concentración de lactato (Lactate Scout, SensLab, Leipzig, Alemania). Durante los últimos 30 s de cada fase de trabajo se solicitó a los sujetos que indicaran la

percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) atendiendo a la escala de Borg (6-20) (Borg, 1982), así como la sensación térmica y la percepción de humedad (Havenith y Heus, 2004). Se empleó una escala categórica de 1 a 9, donde los valores de 1 y 9 se identificaron con *comfortable* y *extremadamente caliente* para analizar la sensación térmica y *seco* y *totalmente empapado* para la sensación de humedad (Havenith y Heus, 2004). Las escalas subjetivas fueron explicadas y administradas de la misma manera por el mismo investigador. Las escalas fueron colocadas delante del tapiz para que los sujetos tuvieran una referencia visual en todo momento.

Para el cálculo de la sudoración total producida, el sudor retenido en la ropa y la evaporación efectiva del sudor, se aplicó la metodología descrita en la Sección 3.2.4 del Estudio 1 (ver página 78). Del mismo modo, la transferencia de calor y el aislamiento térmico de la ropa se calcularon utilizando el método del balance térmico que se describe en la Sección 3.2.4 del Estudio 1 (ver páginas 78-79). El trabajo mecánico efectivo se determinó mediante la ecuación 10 (Parsons, 2003), descrita en la Sección 4.2.4 del Estudio 2 (ver página 100).

#### *5.2.5. Análisis estadístico*

El cálculo del tamaño muestral se determinó mediante un análisis *a priori* de la potencia estadística ( $\alpha < 0.05$ ,  $\beta = 0.2$  de dos colas; potencia = 0.8) realizado con el software G\*Power versión 3.1.9.2 (Universidad de Kiel, Alemania), de modo que se detectara un tamaño del efecto de 0.5 °C en la temperatura gastrointestinal (Smith et al., 1995; Smith y Petruzzello, 1998). El resultado del análisis indicó que un tamaño muestral de 8 es suficiente para alcanzar una potencia estadística del 80%.

Los resultados se expresan como media  $\pm$  desviación estándar (*SD*). La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Las variables analizadas a lo largo de cada prueba se compararon empleando un ANOVA de medidas repetidas de dos vías (Traje  $\times$  Tiempo). El análisis post-hoc para valores *F* significativos se realizó mediante la corrección de Bonferroni y la asunción de esfericidad fue evaluada por medio de la prueba de Mauchly; cuando esta asunción fue violada se realizó el ajuste del nivel de significación mediante la  $\epsilon$  de Greenhouse-Geisser.

El análisis de los datos de sudoración, evaporación, balance térmico, e índice cronotrópico se realizó mediante la prueba *t* de Student para muestras relacionadas. El tamaño del efecto se calculó a través de la  $\eta_p^2$  parcial al cuadrado ( $\eta_p^2$ ) y la *d* de Cohen. Valores de 0.01, 0.06 y 0.14 o de 0.20, 0.50 y 0.80 fueron considerados pequeños, moderados o grandes para la  $\eta_p^2$  y *d*, respectivamente (Cohen, 1988).

La relación entre la FC y  $\text{VO}_2$  se determinó por medio del coeficiente de correlación de Pearson (*r*). Valores de  $p < 0.05$  fueron considerados estadísticamente significativos. El análisis estadístico se realizó mediante el programa SPSS V.19.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA).

### **5.3. RESULTADOS**

La duración de la prueba fue significativamente más corta ( $p < 0.001$ ,  $d = 5.11$ ) cuando los sujetos llevaron puesto el EPI ( $62.4 \pm 13.3$  vs.  $115.5 \pm 5.0$  min). Del mismo modo, los valores medios de  $\text{VO}_2$  ( $2.5 \pm 0.4$  vs.  $2.1 \pm 0.3$  L·min<sup>-1</sup>,

$\eta_p^2 = 0.53$ ), VE ( $81.7 \pm 14.6$  vs.  $70.0 \pm 12.3$  L·min<sup>-1</sup>,  $\eta_p^2 = 0.50$ ) y FC ( $164 \pm 17$  vs.  $147 \pm 19$  ppm,  $\eta_p^2 = 0.81$ ) fueron mayores ( $p < 0.05$ ) cuando se utilizó el EPI. Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las configuraciones estudiadas en los minutos 40, 60 para el VO<sub>2</sub> ( $d = 2.52, 2.50$ ), la VE ( $d = 1.95, 2.05$ ) y la concentración de lactato ( $d = 1.81$  y  $2.05$ ) (Figura 5.1). Los valores de FC fueron mayores en los minutos 20 ( $p < 0.05$ ,  $d = 2.28$ ), 40 ( $p < 0.001$ ,  $d = 3.74$ ) y 60 ( $p < 0.001$ ,  $d = 4.50$ ). Únicamente fueron significativamente mayores ( $p < 0.05$ ) los valores máximos de VO<sub>2</sub> ( $d = 1.06$ ) y VE ( $d = 1.87$ ).

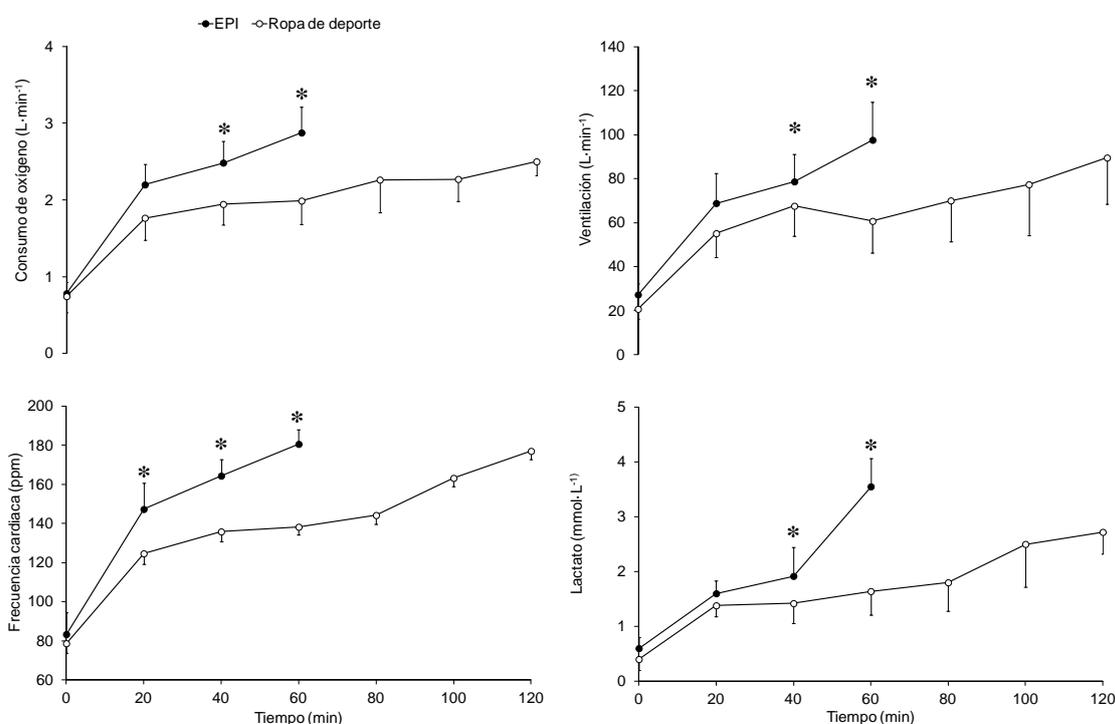


Figura 5.1. Comportamiento del consumo de oxígeno, ventilación, frecuencia cardíaca y concentración de lactato con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

La relación entre el VO<sub>2</sub> y la FC en las pruebas realizadas se muestra en Figura 5.2. Se obtuvo una correlación ( $p < 0.001$ ) de  $r = 0.96$  y  $0.90$  cuando los sujetos llevaron el EPI y la ropa de deporte, respectivamente. El Índice

Cronotrópico obtenido fue mayor ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.66$ ) cuando se llevó el EPI ( $47.1 \pm 7.1$  vs.  $38.2 \pm 3.5$  pulsaciones $\cdot$ L $^{-1}$ ).

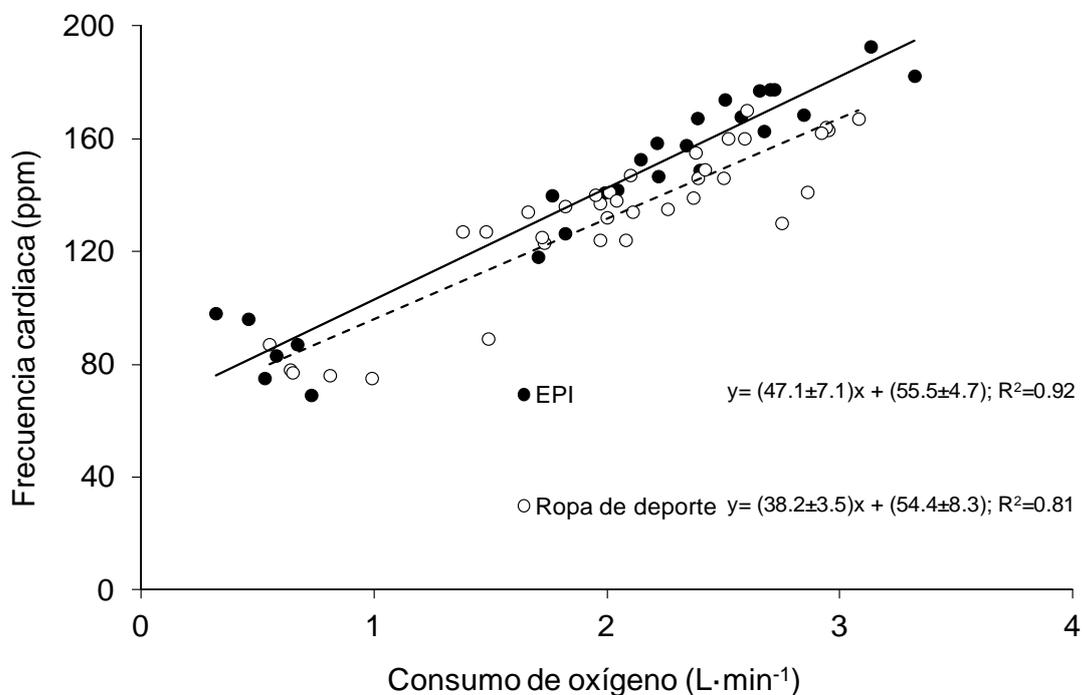


Figura 5.2. Relación entre frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno en la prueba portando el equipo de protección individual (EPI) (línea sólida) y en ropa de deporte (línea discontinua).

Globalmente, tanto la  $T_{\text{gastro}}$  ( $38.3 \pm 0.6$  vs.  $37.7 \pm 0.3$  °C,  $\eta_p^2 = 0.73$ ) como la  $T_{\text{piel}}$  ( $36.7 \pm 0.3$  vs.  $33.8 \pm 0.6$  °C,  $\eta_p^2 = 0.91$ ) fueron significativamente más altas ( $p < 0.001$ ) cuando los sujetos realizaron la prueba con el EPI. Se obtuvieron diferencias significativas en la  $T_{\text{gastro}}$  en los minutos 20 ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.34$ ), 40 ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.45$ ), 60 ( $p < 0.001$ ,  $d = 3.71$ ) y al final de la prueba ( $p < 0.05$ ,  $d = 2.01$ ) (Figura 5.3). La  $T_{\text{piel}}$  fue significativamente más elevada ( $p < 0.001$ ) en la prueba realizada con el EPI en todos los instantes de tiempo analizados ( $d = 3.38, 5.10, 4.31, 5.3$  y  $4.10$ , para los minutos 0, 20, 40, 60 y final de prueba, respectivamente) (Figura 5.3).

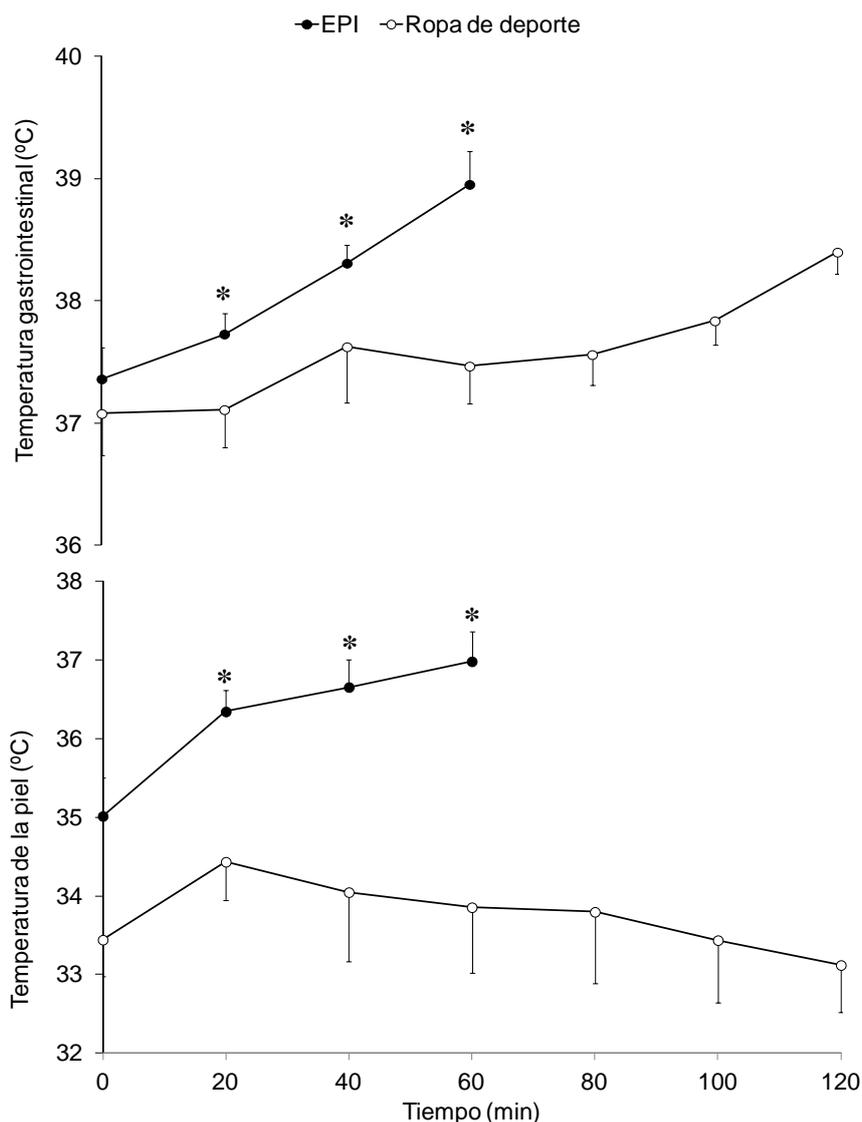


Figura 5.3. Comportamiento de la temperatura gastrointestinal y de la temperatura media de la piel con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

El PSI medio analizado en las pruebas fue significativamente ( $p < 0.05$ ,  $\eta_p^2 = 0.88$ ) mayor en la prueba con EPI ( $6.1 \pm 1.8$  y  $4.7 \pm 1.5$  con EPI y ropa deportiva, respectivamente). Se obtuvieron diferencias significativas en el PSI en los minutos 20 ( $p < 0.05$ ,  $d = 0.87$ ), 40 ( $p < 0.001$ ,  $d = 3.29$ ), 60 ( $p < 0.001$ ,  $d = 5.13$ ) y final ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.56$ ) (Figura 5.4). El índice de estrés fisiológico medio se clasificó como moderado en la prueba realizada con ropa de deporte, mientras

que para la prueba con EPI se clasificó como moderado-alto. Al final de ambas pruebas, los valores alcanzados fueron clasificados como altos-muy altos.

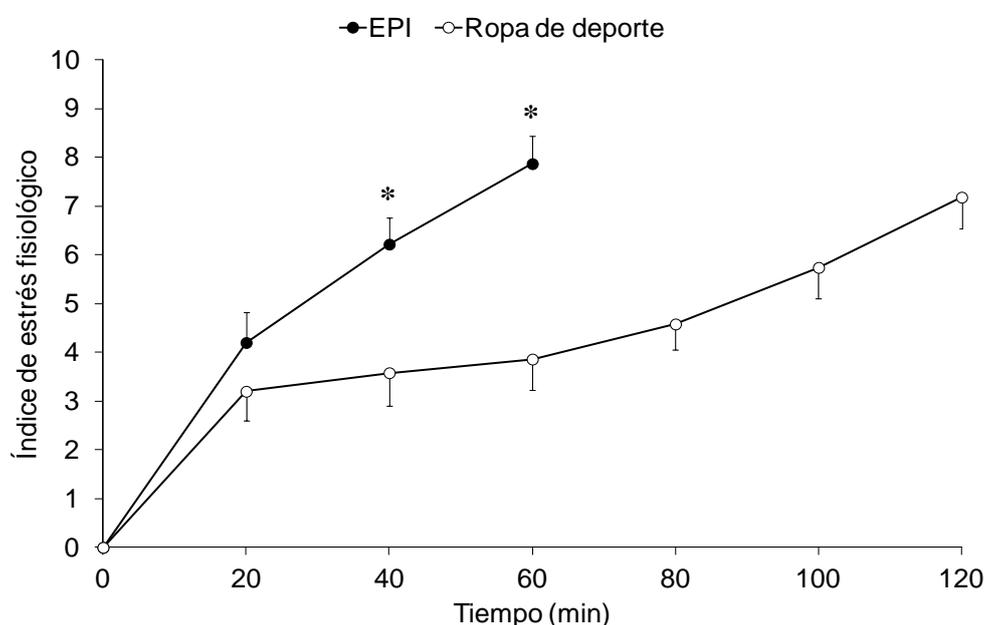


Figura 5.4. Comportamiento de PSI con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Globalmente la RPE fue mayor ( $p < 0.05$ ,  $\eta_p^2 = 0.49$ ) con el uso del EPI ( $13.8 \pm 2.6$ ) que con la ropa de deporte ( $12.4 \pm 2.3$ ). Se obtuvieron diferencias en los minutos 40 ( $p < 0.05$ ,  $d = 2.57$ ), 60 ( $p < 0.05$ ,  $d = 3.00$ ) y al final de la prueba ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.20$ ) entre ambas condiciones (Figura 5.5). Del mismo modo, la sensación térmica de los sujetos fue más alta ( $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.67$ ) con el uso del EPI ( $6.4 \pm 0.8$  vs.  $5.0 \pm 0.7$  llevando el EPI y la ropa deportiva, respectivamente). El contraste de interacción mostró que la sensación térmica en el EPI fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) en todos los instantes de tiempo ( $d = 1.91$ , 1.43, 2.28, 3.13 y 1.21 para los minutos 0, 20, 40, 60 y final, respectivamente). Todas las variables subjetivas (*i.e.*, RPE, sensación térmica) y termofisiológicas (*i.e.*,  $VO_2$ , VE, FC, concentración de lactato,  $T_{gastro}$ ,  $T_{piel}$  y PSI) analizadas, se

incrementaron significativamente en función del tiempo de prueba ( $p < 0.05$ - $0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.64$ - $0.98$ ).

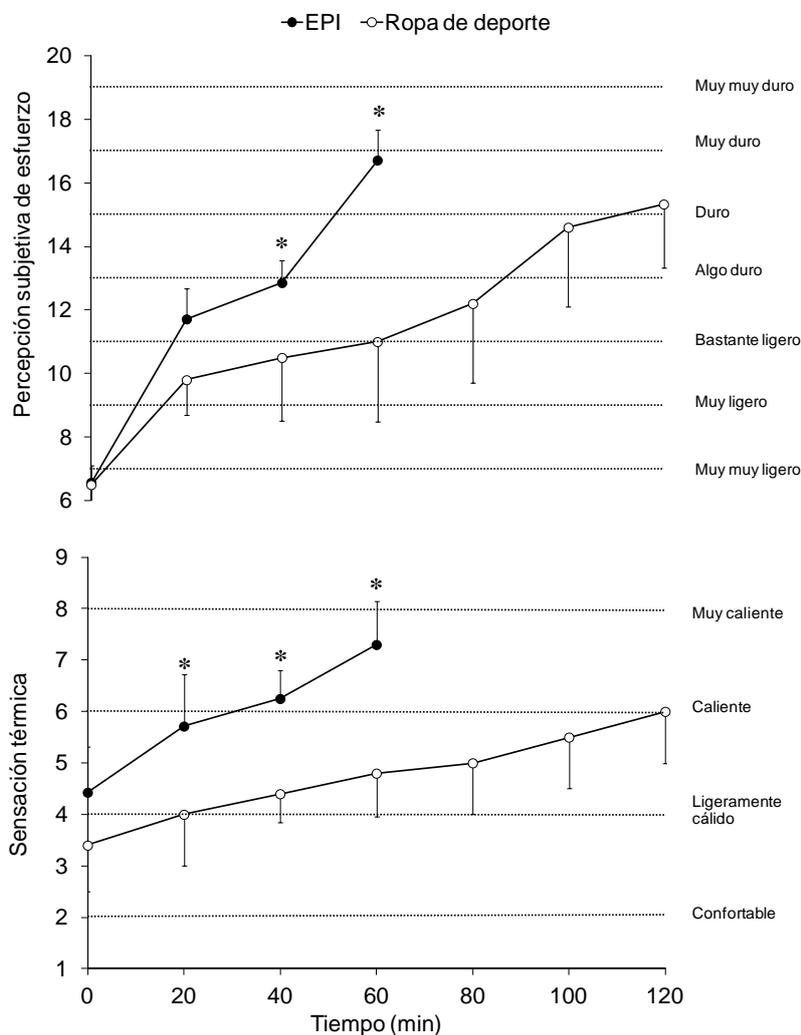


Figura 5.5. Comportamiento de la RPE y la sensación térmica en el equipo de protección individual (EPI) y en la ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

No se encontraron diferencias significativas al comparar la sudoración total ( $d = 0.80$ ). Sin embargo, la tasa de sudoración fue mayor ( $p < 0.001$ ,  $d = 2.88$ ) en la prueba con EPI (Figura 5.6). La cantidad de sudor retenido en el EPI fue significativamente mayor ( $p < 0.001$ ,  $d = 2.52$ ) a la retenida en la ropa deportiva. La evaporación y la eficiencia evaporativa fueron mayores ( $p < 0.001$ ,  $d = 2.22$  y

$p < 0.001$ ,  $d = 2.35$ ) cuando los sujetos llevaron puesta la ropa deportiva (Figura 5.7).

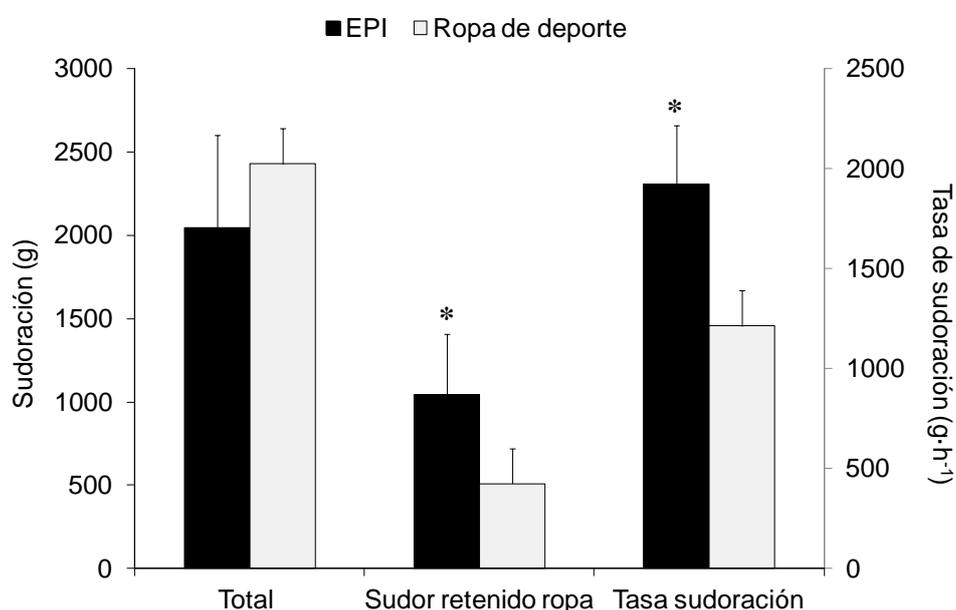


Figura 5.6. Sudoración total, sudor retenido en la ropa y tasa de sudoración en el equipo de protección individual (EPI) y en ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

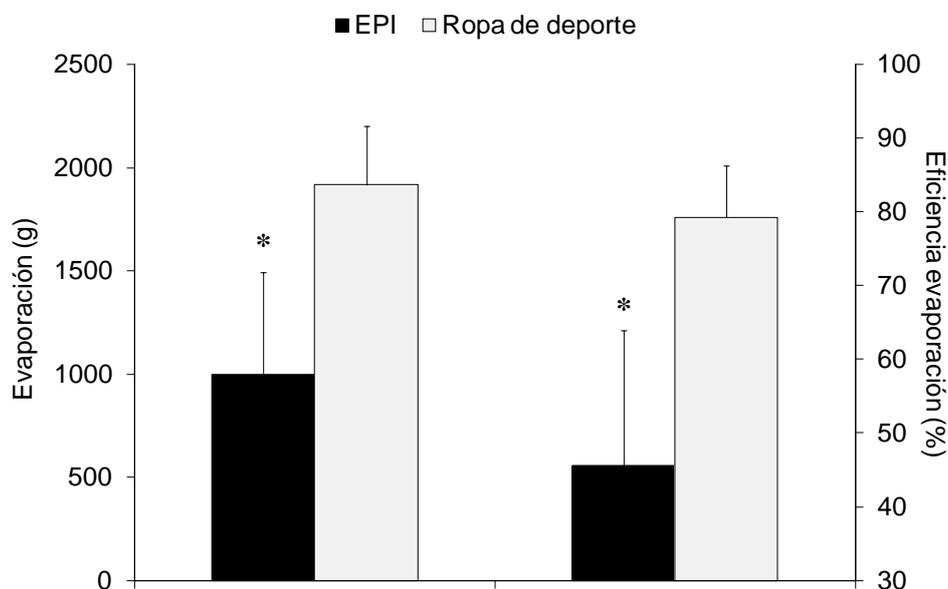


Figura 5.7. Evaporación y eficiencia de la evaporación con el equipo de protección individual (EPI) y ropa de deporte. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Los parámetros estimados del balance térmico se muestran en la *Tabla 5.2*. El almacenamiento de calor y la producción neta de calor metabólico fueron significativamente mayores ( $p < 0.001$ ) en la prueba portando el EPI ( $d = 4.39$  y  $2.64$ , respectivamente). La transferencia de calor seco resultó significativamente menor en la prueba con EPI ( $p < 0.001$ ,  $d = 5.10$ ) por lo que el aislamiento térmico fue mayor con el uso del EPI ( $p < 0.05$ ,  $d = 1.13$ ).

**Tabla 5.2.** Parámetros del balance térmico (media  $\pm$  SD).

	EPI	Ropa de deporte
Almacenamiento de calor ( $W \cdot m^{-2}$ )	$68.0 \pm 12.6^*$	$19.0 \pm 9.1$
Producción neta de calor metabólico ( $W \cdot m^{-2}$ )	$383.3 \pm 26.7^*$	$304.8 \pm 33.1$
Intercambio de calor por respiración ( $W \cdot m^{-2}$ )	$17.4 \pm 0.9$	$16.6 \pm 2.3$
Evaporación ( $W \cdot m^{-2}$ )	$294.0 \pm 50.8$	$338.5 \pm 30.4$
Intercambio de calor seco ( $W \cdot m^{-2}$ )	$27.1 \pm 5.0^*$	$71.7 \pm 10.0$
Aislamiento térmico ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	$0.24 \pm 0.03^*$	$0.08 \pm 0.04$

EPI, equipo de protección individual. \*: diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

## **5.4. DISCUSIÓN**

El principal hallazgo de este estudio fue que la utilización del EPI supuso una reducción significativa del tiempo de tolerancia al esfuerzo, provocado por el incremento de la respuesta fisiológica de los sujetos. Los resultados mostraron un aumento significativo de la carga cardiovascular,  $T_{gastro}$  y  $T_{piel}$ , así como una limitación del balance térmico cuando los sujetos llevaron puesto el EPI.

La alta tasa metabólica alcanzada durante la realización de la prueba incremental ( $410 W \cdot m^{-2}$ ) supuso que no se pudiera mantener el equilibrio térmico, independientemente del tipo de ropa portada (McLellan y Selkirk, 2004;

Fontana et al., 2016). La  $T_{\text{gastro}}$  aumentó a lo largo del tiempo de prueba en ambas condiciones, reflejando una situación de estrés térmico incompensable (Den Hartog et al., 2016). Sin embargo, la  $T_{\text{gastro}}$  se incrementó más rápidamente con el uso del EPI ( $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) que con la ropa de deporte ( $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ), alcanzándose valores finales significativamente más elevados en esta situación ( $39.1 \text{ vs. } 38.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Este hecho, junto con el diferente comportamiento observado en la  $T_{\text{piel}}$  entre configuraciones (*Figura 5.3*), sugiere que el EPI limitó la disipación del calor metabólico generado. Estos hallazgos están en consonancia con los obtenidos previamente en bomberos de estructura (Smith et al., 1995; Fogarty et al., 2004; Bruce-Low et al., 2007).

La limitación de la disipación del calor con el uso del EPI favoreció un aumento de la  $T_{\text{piel}}$  (Holmér, 2006). El incremento de la  $T_{\text{piel}}$  analizado en este estudio con el EPI ( $2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fue similar al descrito en otros trabajos con bomberos de estructura ( $\sim 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Bruce-Low et al., 2007; Fontana et al., 2016) o con el uso de trajes de protección química (Wen et al., 2015). Sin embargo, la tasa de incremento analizada ( $0.003 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) fue menor a la descrita previamente ( $0.166\text{-}0.250 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) en bomberos de estructura (Smith et al., 1995; Bruce-Low et al., 2007; Fontana et al., 2016). Esto pudiera estar condicionado por los diferentes protocolos y condiciones ambientales reproducidas en los estudios (Nunneley, 1989; Chevront et al., 2010), además del mayor nivel de aislamiento térmico del EPI de este colectivo (Holmér et al., 2006). Así, en condiciones ambientales similares a las reproducidas en este estudio, pero usando un EPI de mayor aislamiento térmico,  $\sim 0.47 \text{ m}^{-2}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  vs.  $0.23 \text{ m}^{-2}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  (Raimundo y Figueiredo, 2009), la tasa de

incremento de la  $T_{\text{gastro}}$  obtenida en bomberos de estructura ( $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) (Selkirk y McLellan, 2004) fue superior a la de este estudio ( $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

Sin embargo, nuestros resultados fueron superiores a los obtenidos por Den Hartog et al. (2016) ( $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) en bomberos forestales cuando reprodujeron unas condiciones ambientales similares a las del presente estudio. Por ello, posiblemente la mayor intensidad del ejercicio de nuestro estudio frente a la de Den Hartog et al. (2016) condicionó esta respuesta ( $410 \text{ vs. } 290 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Nuestros resultados confirman que la prueba con EPI supuso un incremento del 19% en el  $\text{VO}_2$  y en la producción de calor metabólico ( $445 \text{ vs. } 375 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). El mayor peso que supone el EPI completo ( $\sim 6 \text{ kg}$ ) respecto a la configuración en ropa deportiva podría explicar en parte estos resultados (Dorman y Havenith, 2009; Lee et al., 2014). Además, ayudaría a comprender los mayores incrementos ( $>20\%$ ) hallados en bomberos de estructura donde el EPI completo, incluido el equipo de respiración autónoma, tiene un peso de  $\sim 26 \text{ kg}$  (Sköldström, 1987; Smith et al., 1995; Dreger et al., 2006; Lee et al., 2014).

La disminución de la economía del movimiento debido al uso de las botas de extinción también pudo contribuir al incremento metabólico analizado. Varios estudios han demostrado la importancia que tiene la distribución del peso del EPI respecto al centro de gravedad, en la respuesta fisiológica de los sujetos (Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014).

En este sentido, se ha informado que las botas de los bomberos de estructuras ( $\sim 2.4 \text{ kg}$ ) pueden suponer un incremento de hasta  $\sim 11\%$  en el coste metabólico (Taylor et al., 2012) y limitan significativamente la disipación de

calor (Lee et al., 2014). Por ello, el uso de las botas en este estudio (~2 kg) podría haber contribuido de manera relevante al aumento del  $VO_2$ .

Globalmente, la FC obtenida en la prueba con EPI fue ~18 ppm (12%) mayor que la prueba control. Esta diferencia fue más marcada (23%) en el estadio final de la prueba con EPI (minuto 60). Esta disminución de la eficiencia del movimiento, provocada por el incremento del coste metabólico y termorregulatorio, ha sido previamente observada en otros estudios (Sköldström, 1987; Bruce-Low et al., 2007; Smith et al., 2012). La mayor  $T_{gastro}$  observada con el uso del EPI pudiera condicionar un aumento del flujo sanguíneo hacia la piel para mejorar la eficiencia termorregulatoria (Smith et al., 2012). Sin embargo, el desplazamiento del flujo sanguíneo desde los músculos activos hacia la periferia reduciría el gasto cardíaco disponible e incrementaría en mayor medida el  $VO_2$  y la FC (Gonzalez-Alonso et al., 1999; Chevront et al., 2010). El aumento del flujo sanguíneo periférico sería responsable también del aumento de la temperatura de la piel observado (Ely et al., 2010).

Se ha descrito que el rendimiento aeróbico de los sujetos durante la realización de esfuerzos submáximos en calor está relacionado con el gradiente de temperatura central-piel (Chevront et al., 2010). Una temperatura media de la piel superior a 35 °C supone un incremento significativo del flujo sanguíneo periférico que afecta al rendimiento aeróbico en ausencia de deshidratación (Ely et al., 2010; Cuddy et al., 2014). Nuestros resultados muestran una  $T_{piel}$  media muy por encima de los 35 °C en comparación con la prueba realizada en ropa de deporte ( $36.6 \pm 0.3$  vs.  $33.8 \pm 0.6$  °C). Este hecho, junto con la reducción del gradiente  $T_{gastro}-T_{piel}$  (1.7 y 3.9 °C con el uso del EPI y la ropa deportiva,

respectivamente), habrían contribuido a incrementar la carga cardiovascular analizada en este estudio (Cuddy et al., 2014).

Se ha planteado que la restricción termorregulatoria que provoca el EPI podría modificar la relación entre la FC y el  $VO_2$  (*i.e.*, Índice Cronotrópico) (Smith et al., 2012). Nuestros datos reflejan un incremento significativo del Índice Cronotrópico entre condiciones (*Figura 5.2*). Estudios anteriores, realizados en bomberos de estructura, no han observado modificaciones significativas de este índice con el uso del EPI (Smith et al., 2012). Posiblemente, este comportamiento esté relacionado con la corta duración del protocolo seleccionado por estos autores (~12 min) frente al de nuestro estudio (62 min). Así, se ha descrito la necesidad de elegir pruebas de larga duración (*i.e.*, 45 min) para observar los cambios termorregulatorios provocados por el uso del EPI (Levine et al., 1998).

El incremento de la respuesta fisiológica provocada por el uso del EPI conllevó una reducción del rendimiento de los sujetos (*i.e.*, disminución de la tolerancia al esfuerzo) de aproximadamente el 46%. Este efecto fue muy superior al que tuvo el EPI (~23%) (Holmér et al., 2006) o el traje de protección en bomberos de estructura (~10%) (Fogarty et al., 2004; Kofler et al., 2015). Posiblemente, los diferentes protocolos utilizados en los estudios (*i.e.*, tasa metabólica, condiciones ambientales) como el aislamiento térmico de la ropa y otros elementos del EPI, hayan influido en el tiempo de tolerancia observado entre estudios (Selkirk y McLellan, 2004).

La respuesta termofisiológica aumentada en la prueba con EPI conllevó un incremento en los valores de las variables subjetivas analizadas (*Figura 5.5*).

Se ha vinculado el aumento de la RPE y la sensación térmica con el aumento de la  $T_{piel}$  ante una intensidad del ejercicio preestablecida (Schlader et al., 2011). Además, la sensación térmica se ha relacionado con la temperatura central del organismo (Tikuisis et al., 2002). Este hecho explicaría porque los valores analizados en este trabajo fueron mayores a los informados en bomberos de estructura (Smith et al., 1995) con el uso de EPIs completos bajo condiciones termoneutras y en pruebas de corta duración (15 min). Los sujetos del estudio de Smith et al. (1995) alcanzaron  $T_{piel}$ , mayores a las observadas por nosotros, sin embargo, su temperatura central fue menor (38.2 °C).

Los resultados del balance térmico (*Tabla 5.2*) confirman que el uso del EPI reduce notablemente la transferencia de calor (Nunneley, 1989; Holmér, 2006). El uso de los guantes, el casco y las botas afectó a la respuesta termorreguladora de los sujetos ya que disminuyó la superficie corporal expuesta al ambiente, dificultando así la pérdida de calor (Montain et al., 1994; Lee et al., 2014). El uso del EPI redujo la evaporación del sudor en un 13% respecto a la ropa de deporte, mientras que la transferencia de calor seco estimada se redujo un 62% (*Tabla 5.2*). Estos resultados provocaron un incremento significativo del 72% en el almacenamiento de calor respecto a la ropa de deporte, siendo este valor mayor al descrito por otros estudios (Kofler et al., 2015; Den Hartog et al., 2016).

Del mismo modo, la diferencia en la transferencia de calor seco observada entre condiciones de  $\sim 45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , fue muy superior a los  $\sim 17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  descritos por Kofler et al. (2015) en un traje de protección ligero. Puesto que en el trabajo de Kofler et al. (2015) sólo se evaluó el traje de protección, similar al

usado en el presente estudio, podemos especular que el efecto que tiene el uso de los demás componentes del EPI de los bomberos forestales (casco, guantes y botas fundamentalmente) puede conllevar una restricción de la transferencia del calor seco mayor o igual a la que supone el traje de protección.

Estos resultados realzan la importancia que tienen los diferentes elementos que integran el EPI en el balance térmico de los bomberos forestales. En este sentido, se ha descrito que la tasa de disipación de calor de la cabeza es 8 veces superior al del resto de la superficie corporal, debido a su alta relación superficie/volumen (Rasch et al., 1991). Así, cuando se lleva ropa de protección en condiciones de calor, la cabeza se convierte en la principal zona de disipación de calor. Por ello, el uso del casco supondría un elevado impacto en el balance térmico (Montain et al., 1994; Caldwell et al., 2011).

La sudoración total producida fue similar en ambas condiciones. Sin embargo, debido a la reducción del tiempo de tolerancia en la prueba con EPI, la tasa de sudoración resultó significativamente mayor respecto a la ropa de deporte. Además, el EPI retuvo más sudor lo que limitó sustancialmente la evaporación. El comportamiento observado de la sudoración está en consonancia con lo descrito por otros estudios (Montain et al., 1994; Fogarty et al., 2004; Holmér et al., 2006; Caldwell et al., 2011; Kofler et al., 2015).

Estos resultados ponen de relieve que el incremento de la tasa de sudoración para mejorar la eficiencia de la termorregulación no se tradujo en un mejor rendimiento de la evaporación del sudor. Posiblemente, esto sea debido a la retención del sudor por la ropa u otros componentes del EPI, lo cual reduce la eficiencia evaporativa (Nunneley, 1989). Den Hartog et al. (2016) analizaron una

eficiencia evaporativa promedio de diferentes EPIs forestales del (76%) muy superior a la obtenida por nosotros (46%). Esta diferencia podría estar relacionada con el contenido de fibras hidrófilas (*i.e.*, algodón o viscosa) en el traje analizado (56% de viscosa) frente a la ausencia total de este material en los trajes analizados por de Den Hartog et al. (2016). Se ha demostrado que los materiales hidrófilos poseen una alta capacidad de retención de la humedad, lo que limita su evaporación (Kwon et al., 1998).



A silhouette of a firefighter wearing a helmet with a headlamp, working in a forest fire. The firefighter is holding a tool, possibly a hose or a pump, and is positioned in the foreground, looking towards the right. The background is filled with bright orange and yellow flames and smoke, creating a dramatic and intense atmosphere. The firefighter's gear is dark, contrasting sharply with the bright fire.

**6. ESTUDIO 4. CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE TÉRMICO DURANTE LA EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**



## **6.1. INTRODUCCIÓN.**

La realización de actividad en un ambiente térmico elevado supone un incremento de la respuesta termofisiológica de las personas respecto a aquella desarrollada en condiciones templadas (Sköldström, 1987; Smith et al., 1997; Bruce-Low et al., 2007). Modificaciones en la dureza del trabajo realizado (*e.g.*, realizando un trabajo físico intenso) y en la restricción de la disipación del calor metabólico producido por el uso de ropas de protección, pueden aumentar la carga térmica (Selkirk y McLellan, 2004). Estas circunstancias adquieren especial importancia durante la extinción de los incendios forestales. El PEEIF durante el desempeño de su trabajo se ve expuesto a condiciones ambientales que implican la exposición al flujo de calor procedente de las llamas (Budd et al., 1997; Butler y Cohen, 1998) y pueden llegar a soportar altas temperaturas ambientales (Rodríguez-Marroyo et al., 2012; Cuddy et al., 2015). Además, el uso de su Equipo de Protección Individual (EPI) resulta obligatorio para

protegerles de la exposición térmica (Raimundo y Figueiredo, 2009; Nayak, 2014), por lo que el estrés térmico al que se ven sometidos durante las tareas de extinción es considerable (Budd et al., 1997; Cuddy et al., 2015).

Por otro lado, trabajar cerca del fuego incrementa el riesgo de sufrir quemaduras debido a la exposición directa a la radiación térmica y a los gases de convección emitidos por las llamas (Hockey y Rew, 1996; Rossi, 2003; Nayak et al., 2014). En este sentido la ropa de protección que forma parte del EPI, está confeccionada con tejidos que poseen una alta resistencia al calor y al contacto directo con la llama (i.e., Nomex, Kevlar) (Song et al., 2011) y sus prestaciones se certifican en ensayos de laboratorio (ISO 15384, 2003). A pesar de ello, se ha informado en bomberos forestales estadounidenses que el 66% de las lesiones producidas durante la extinción de incendios forestales entre los años 2003 y 2007 se debieron a quemaduras producidas durante la extinción de los incendios (Britton et al. 2013). Esto sugiere que la protección ofrecida por los tejidos y testada en laboratorio, no se corresponde con el comportamiento observado en condiciones reales (Song, 2011). Por ello, otros factores como la magnitud y el tiempo de exposición al flujo de calor de las llamas, la composición y el número de capas de la ropa de protección, el ajuste de las prendas (i.e., capa de aire entre el tejido y la piel) o el contenido de humedad del tejido, pueden estar influyendo en la cantidad de calor transmitido al interior de la ropa y resultar determinantes en la aparición de quemaduras, incluso con exposiciones a flujos de calor consideradas moderadas (Raimundo y Figueiredo, 2009; Song 2011).

A pesar de la importancia que supone el ambiente térmico en la respuesta termofisiológica de las personas (Selkirk y McLellan, 2004) y en el riesgo de

sufrir quemaduras (Song et al., 2011), hay una escasez de estudios que analicen la exposición ambiental durante la extinción de incendios. En bomberos de estructuras, varios trabajos han analizado el ambiente térmico durante la realización de entrenamientos en presencia de fuego real. Foster y Roberts, (1994) analizaron la temperatura y el flujo de calor durante la realización de entrenamientos, mediante la colocación de sensores que los sujetos llevaban sobre la ropa de protección. En este estudio, las condiciones más frecuentes, calificadas como "rutinarias" supusieron un flujo de calor  $\sim 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  con valores promedio de temperatura ambiental de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sin embargo, las condiciones consideradas como peligrosas supusieron flujos de calor de entre  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , registrándose temperaturas ambientales de entre  $100$  y  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  (Foster y Roberts, 1994).

En las condiciones consideradas como extremas o críticas se analizaron valores de flujo de radiación superiores a  $10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , alcanzándose temperaturas ambientales de hasta  $235 \text{ }^\circ\text{C}$  (Foster y Roberts, 1994). La tolerancia a estos ambientes sería de entorno al minuto, antes de que el equipo de protección comenzase a sufrir serios daños (Foster y Roberts, 1994). Willi et al. (2016) analizaron el ambiente térmico al que se exponen los bomberos de estructura durante la realización de simulaciones de entrenamiento, mediante sensores de flujo de calor y temperatura colocados en el casco de los bomberos.

Para caracterizar la exposición dividieron las condiciones ambientales en 4 clases de exposición (Clase I flujo de calor  $\leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y temperatura  $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Clase II  $1000 < \text{flujo de calor} \leq 2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y temperatura  $\leq 160 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Clase III  $2000 < \text{flujo de calor} \leq 10000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y temperatura  $\leq 260 \text{ }^\circ\text{C}$  y Clase IV flujo

de calor  $> 10000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y temperatura  $> 260 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Estos autores reportaron flujos de calor radiante entre 3000 y 6000  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  con temperaturas entre 150 y 200  $^\circ\text{C}$  (Clase de exposición III), considerados niveles de exposición severos, mientras que en las exposiciones moderadas el flujo de calor fue menor a 1000  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  con temperaturas en torno a 50  $^\circ\text{C}$ . Otros estudios (Krasny et al., 1988; Rossi, 2003) han analizado exposiciones térmicas en bomberos de estructura que van desde los 100 hasta los 300  $^\circ\text{C}$  con flujos de calor de entre 5  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  y 12  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Puntualmente se han observado exposiciones por encima de los 20  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  con picos máximos de 42  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  (Rossi, 2003). Las mediciones realizadas en estos estudios (Krasny et al., 1988; Rossi, 2003) no fueron realizadas en el ambiente próximo al bombero, si no que se realizaron en posiciones fijas, lo cual puede no reflejar las condiciones reales de trabajo de estos bomberos (Willi et al., 2016).

En bomberos forestales, los estudios se han centrado en aplicar modelos matemáticos, para predecir el flujo de calor recibido y el riesgo de quemaduras en situaciones de atrapamiento por las llamas, que permitieran diseñar refugios contra incendios (Webster, 1986; Fogarty, 1996). Hasta donde llega nuestro conocimiento, sólo dos trabajos han analizado las condiciones ambientales simuladas de trabajo durante la extinción. King et al. (1962) registraron la temperatura y flujo de calor radiante durante la extinción de incendios forestales simulados, en función de la altura de la llama y la distancia al frente. El flujo de calor radiante osciló entre 0.4 y 4.6  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  y supuso un incremento de la temperatura ambiental de entre 3 y 25  $^\circ\text{C}$  (King et al., 1962). Budd et al. (1997b) describieron las condiciones ambientales durante quemas experimentales en Australia y lo relacionaron con su efecto sobre el balance térmico de los sujetos. La temperatura ambiental promedio fue de 29  $^\circ\text{C}$  (19 – 35  $^\circ\text{C}$ ) y se registró una

temperatura radiante de 66 °C (33 – 96 °C) (Budd et al., 1997). La carga de calor radiante analizada alcanzó valores que oscilaron entre los 0.7 y 8.6 kW·m<sup>-2</sup>, siendo el valor de exposición más frecuente 1.6 kW·m<sup>-2</sup> (Budd et al., 1997). En conjunto, la temperatura ambiental y el flujo de calor radiante analizados en el estudio de Budd et al. (1997b) supusieron una carga térmica neta de 200 W.

El conocimiento de las condiciones reales de trabajo (*i.e.*, ambiente térmico) a las que se ven sometidos los bomberos forestales durante la extinción de los incendios, puede ayudar a conocer y comprender el estrés térmico al que se ven sometidos y el riesgo que tienen de sufrir quemaduras (Willi et al., 2016). Por ello, el objetivo principal de este estudio fue analizar en situaciones reales el ambiente térmico en el que trabajan los bomberos forestales. Secundariamente se analizó el factor de atenuación del flujo de calor que supone el traje de protección en situaciones de trabajo real. También se estimó la dosis de radiación térmica recibida y la probabilidad de sufrir quemaduras durante la extinción de incendios reales.

## **6.2. METODOLOGÍA**

### *6.2.1. Sujetos*

Se seleccionaron 5 sujetos (media  $\pm$  SD; edad, 28  $\pm$  1 años; peso, 76.2  $\pm$  0.9 kg, altura, 175.5  $\pm$  0.5 cm) pertenecientes a la Brigada de Refuerzo contra Incendios Forestales (BRIF) de Tabuyo del Monte (León) y a la Cuadrilla de Acción Rápida (CAR) de Sahechores (León). Los sujetos fueron seleccionados para que tuvieran una experiencia mínima de 2 años en la extinción de incendios

y formaran parte de cuadrillas diferentes. Este hecho permitió cubrir todos los turnos de trabajo y maximizar la probabilidad de asistir y analizar un incendio.

### *6.2.2. Diseño experimental*

El estudio se llevó a cabo durante varias campañas no consecutivas. En los incendios analizados en cada campaña (*i.e.*, Junio-Octubre) se registró el flujo de calor y la temperatura ambiental soportada por los bomberos durante las tareas de extinción. Para ello, los sujetos llevaron un traje de protección modificado, en el que se colocaron los sensores y registradores portátiles cuando llegaba el aviso de salida a un incendio. El preparador físico de la base, previamente formado acerca del funcionamiento de los instrumentos, colocaba el traje con el sistema de adquisición de datos y comprobaba que estuvieran preparados para el registro. Durante los incendios, para facilitar el análisis de los datos, se registró: la hora de salida de la base, el tiempo de transporte hasta el incendio, la aproximación al fuego, los tiempos de cada tarea de extinción y la hora de retorno a la base tras finalizar. Ante la imposibilidad de estar en las labores de extinción, fueron los preparadores físicos de las bases quienes registraron los tiempos. Posteriormente a los incendios se procedió al volcado y análisis de los datos recogidos.

### *6.2.3. Análisis de los incendios*

Se registraron un total de 35 incendios, sin embargo 17 de ellos fueron descartados para su análisis por algún problema en la señal (*i.e.*, pérdida de conexión con el registrador o conexión defectuosa) o porque alguno de los sensores se dañó o se perdió durante la extinción de los incendios. Así el número

de incendios analizados finalmente fue de 18. En cada incendio se clasificó el tiempo total de extinción según el tipo de trabajo realizado en ataque directo, contrafuego, remate y vigilancia. Esta división de las tareas se realizó teniendo en cuenta la importancia de las mismas en el tiempo total de extinción y porque se realizan en fases claramente separadas que permitieron una identificación más clara. El ataque directo supone realizar tareas de extinción cerca de las llamas ( $<0.5$  m). El contrafuego consiste en quemar el combustible entre el frente del incendio y una franja libre de vegetación y se trabaja a distancia del frente del incendio ( $>100$  m). El remate consiste en sofocar los rescoldos que quedan una vez el incendio es controlado, mientras que la vigilancia se realiza en el perímetro y consiste en controlar la zona quemada para evitar la reproducción de focos una vez extinguido el incendio.

Para realizar la toma de datos ambientales (*i.e.*, flujo de calor y temperatura) durante los trabajos de extinción, el sistema de adquisición de datos debía ser portátil, no limitar los movimientos ni interferir con ningún elemento del Equipo de Protección Individual (EPI). Por ello, la empresa fabricante (Confecciones Oroel, La Muela, Zaragoza) fabricó 10 trajes (*i.e.*, dos por sujeto) con modificaciones en el diseño (*i.e.*, orificios, canalizaciones y bolsillos) que permitieran colocar y transportar la instrumentación de medida de modo seguro sin afectar a las características protectoras del traje.

El flujo de calor se midió mediante 4 sensores (*i.e.*, calor radiante + convectivo) que se colocaron en el traje de extinción. Siguiendo las instrucciones del fabricante, 2 de los sensores de flujo de calor (Captec Enterprise, Lille, France; superficie:  $4\text{ cm}^2$ ; espesor:  $0.4\text{ mm}$ ; rango:  $\pm 50\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ; sensibilidad:

3.08-3.82  $\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se fijaron directamente en el tejido empleando su superficie posterior adhesiva. Estos sensores se colocaron en la superficie exterior del traje a la altura del pecho y muslo izquierdos (*Figura 6.1*). Otros dos sensores se colocaron en la cara interior del traje a la altura del pecho y el muslo de manera paralela a los colocados exteriormente y se fijaron empleando las canalizaciones de tela construidas para tal fin y se aseguraron con cinta adhesiva (*Figura 6.1*). Para obtener el flujo de calor incidente en el exterior e interior del traje, los sensores se colocaron con la superficie receptora hacia el exterior en el sentido de la mayor radiación incidente esperada (Raj, 2008). Se consideraron como ganancia de flujo de calor los valores registrados con signo positivo, mientras que los valores de flujo negativo se consideraron como pérdidas de calor. Los 4 sensores se conectaron a un registrador de datos de cuatro canales (QuadVolt  $\pm 100$  mV, Madgetech, Warner, NH, USA; rango:  $\pm 30$   $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ; resolución:  $1.43$   $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). El flujo de calor se registró cada 5 s (0.2 Hz) de manera continua desde la salida de la base hasta el regreso al finalizar la extinción, cuando se procedió al volcado de los datos a un ordenador y se reiniciaban los registradores.

Se calculó el factor de atenuación que supone la ropa de protección como la cantidad de calor recibido en los sensores interiores, respecto al flujo de calor incidente en el exterior, empleando la ecuación 13 (Raj, 2008):

$$FA = \left[ \frac{q_{int}}{q_{ext}} - 1 \right] \times 100 \quad [13]$$

donde  $FA$  es el factor de atenuación del flujo de calor incidente (%),  $q_{int}$  es el flujo de calor registrado en el sensor interior ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y  $q_{ext}$  es el flujo de calor registrado en el sensor exterior ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).



Figura 6.1. Izquierda vista general de los sensores exteriores. Derecha colocación de los sensores interiores y de los registradores de datos.

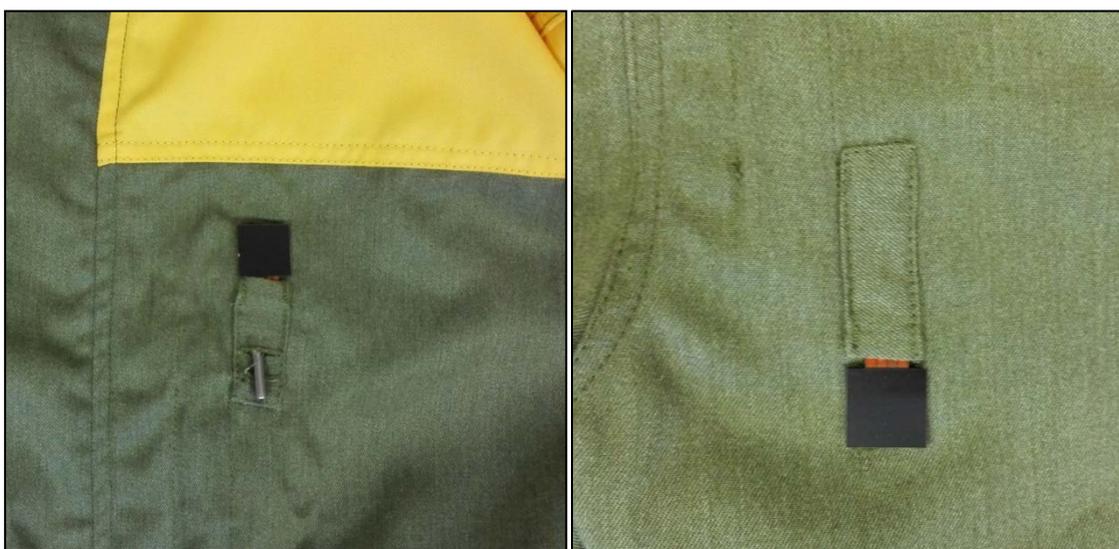


Figura 6.2. Derecha detalle del sensor de flujo de calor y sonda de temperatura exteriores en la zona del pecho. Izquierda detalle del sensor de flujo de calor del muslo.

Para caracterizar la peligrosidad de la exposición térmica, se establecieron 4 zonas de intensidad en función del flujo de calor registrado en los sensores interiores, siguiendo una metodología similar a la empleada en bomberos de estructura (Krasny et al., 1988; Foster y Roberts, 1994; Rossi, 2003): Clase 1, flujo de calor  $\leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 2  $1000 < \text{flujo de calor} \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 3,  $5000 < \text{flujo de calor} \leq 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 4 flujo de calor  $> 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Un flujo de calor de  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  se corresponde con el flujo de calor recibido un día de verano y se asume que no supone daños para cualquier tiempo de exposición (Raj, 2008a; Arnaldos et al., 2004). Flujos de calor de  $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pueden producir dolor tras exposiciones de 15 s y quemaduras de segundo grado en exposiciones de 30 s. Este valor se considera el límite, consensuado internacionalmente, de exposición a la radiación térmica para personas sin protección (Raj, 2008a). Valores de  $7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  son los máximos tolerables para los bomberos completamente cubiertos con ropa de Nomex de  $210 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  de espesor, los cuales pueden llegar a sufrir quemaduras de segundo grado tras 90 s de exposición (Butler y Cohen, 1998).

Con el flujo de calor registrado en el interior del traje de protección y el tiempo de exposición analizado, se calculó la dosis de radiación térmica recibida para cada clase de exposición mediante la ecuación 14 (Kinsman, 1991):

$$\text{TDU} = (q)^{4/3} \times t \quad [14]$$

donde  $\text{TDU}$  es la dosis de radiación térmica ( $[\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}]^{4/3}\cdot\text{s}$ ),  $q$  es la intensidad del flujo de calor recibido ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y  $t$  es la duración de la exposición (s).

Para estimar la probabilidad de sufrir quemaduras de primer grado, se empleó el método de vulnerabilidad a la radiación térmica (Einsenberget al.,

1975), teniendo en cuenta el flujo de calor registrado en el interior del traje. Para ello, se relacionó la dosis de radiación térmica calculada con la probabilidad de que ésta produzca daños (*i.e.*, relación causa-efecto) mediante el cálculo de la variable probit (Y) a través de la ecuación 15 (Pietersen, 1990):

$$Y = -39.83 + 3.0186 \times \ln \text{TDU} \quad [15]$$

Con el valor de la variable probit (Y), se determinó el porcentaje de personas expuestas que sufrirían quemaduras de primer grado, empleando la tabla de probabilidad acumulada determinada experimentalmente (Finney, 1971; Pietersen, 1990). Para valores de la variable probit (Y) menores que 2.67 el porcentaje de personas afectadas por la dosis de radiación térmica sería del 0% mientras que un valor de  $Y \geq 8.09$  significaría que el 100% de las personas expuestas sufrirían quemaduras de primer grado.

La temperatura exterior en el ambiente de trabajo se registró mediante una sonda resistiva de temperatura tipo PT100 (ControlTemp, Santa Perpetua de Mogoda, Barcelona; rango: -200 a 650 °C; precisión:  $\pm [0.30+0,005 \times t]$  °C), que se colocó en el pecho a la misma altura que los sensores de calor (*Figura 6.1*). La sonda de temperatura se conectó a un registrador de datos específico (LogBox AA IP65; Novus, Porto Alegre, Brasil; rango: -40 a 70 °C; precisión: 0.2% FS) y se guardó en un bolsillo interior del traje de extinción, especialmente diseñado (*Figura 6.2*). La temperatura del ambiente de trabajo se registró cada 5 s (0.2 Hz) de manera continua, desde la salida de la base hasta el regreso al finalizar de la extinción. Los datos de temperatura se clasificaron en función de la tarea realizada (*i.e.*, ataque directo, contrafuego, remate y vigilancia). Para comparar la temperatura del ambiente de trabajo con la temperatura en el área geográfica del

incendio, se tomó la temperatura ambiental media de la zona de los partes diarios de riesgo de incendio, emitidos por la Agencia Estatal de Meteorología.

#### *6.2.4. Análisis estadístico*

Previamente al tratamiento estadístico de los datos se realizó un control de calidad de los mismos eliminando los outliers. A continuación se realizó un suavizado de la serie de datos aplicando la media móvil de 3 valores (*i.e.*, 15 s) (Willi et al., 2016). Los resultados se expresan como media  $\pm$  desviación estándar (*SD*) en las tablas, además el intervalo de confianza para un  $\alpha= 0.05$  fue reportado en el texto.

La suposición de normalidad se verificó utilizando la prueba de Shapiro-Wilk. En el caso de que las variables no cumplieran este supuesto se realizó una transformación logarítmica de los datos. El flujo de calor medio y máximo, el tiempo de exposición y el porcentaje de exposición se compararon según su posición (*i.e.*, pecho *vs.* muslo) y su localización (*i.e.*, exterior *vs.* interior) utilizando un ANOVA de 2 factores inter-sujeto (localización  $\times$  posición). Se aplicó un ANOVA de 3 factores (posición  $\times$  clase de exposición  $\times$  tarea) para comparar las variables analizadas en los sensores interiores.

La temperatura exterior media y máxima se analizaron mediante un ANOVA de un factor en función del tipo de tarea realizada. Cuando se encontró un valor *F* significativo, se utilizó el test de Bonferroni para establecer diferencias significativas entre las medias. La comparación de la temperatura ambiental en la zona del incendio respecto la temperatura en el ambiente de trabajo se realizó mediante una *t* de Student para muestras relacionadas. Los valores de  $p < 0.05$  se consideraron estadísticamente significativos. Se utilizó el

software estadístico SPSS V.19.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) para el análisis.

### 6.3. RESULTADOS

El tiempo medio de extinción en los incendios analizados fue de  $175.2 \pm 114.6$  min [122.3, 228.1]. El flujo de calor medio fue de  $472 \pm 350$  W·m<sup>-2</sup> [310, 634], alcanzándose un valor de  $580.0 \pm 447.5$  W·m<sup>-2</sup> [381.3, 786.4] en el exterior y  $364.5 \pm 308.3$  W·m<sup>-2</sup> [222.1, 506.9] dentro del traje (*Tabla 6.1*). El flujo de calor máximo medio registrado fue de  $4465.5 \pm 3597.0$  W·m<sup>-2</sup> [2803.8, 6127.2]. En el exterior el flujo de calor máximo alcanzó un valor de  $6014.4 \pm 4733.9$  W·m<sup>-2</sup> [3827.5, 8201.3], mientras que en el interior fue de  $2916.7 \pm 2714.4$  W·m<sup>-2</sup> [1662.8, 4170.6]. El flujo de calor medio y máximo, el tiempo de exposición y el ratio tiempo exposición / tiempo de extinción fueron significativamente mayores ( $p < 0.05$ ) en el exterior respecto a su homólogo colocado interiormente. El factor de atenuación del traje fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) en el muslo respecto al analizado en el pecho, con un valor total de  $67.0 \pm 7.7\%$  [63.5, 70.5]. El tiempo medio de exposición fue de  $61.0 \pm 53.8$  min [36.2, 85.8], por lo que el porcentaje de exposición respecto al tiempo de extinción fue de  $36.6 \pm 21.0\%$  [26.9, 46.3] (*Tabla 6.1*).

El comportamiento de las variables analizadas en función de las clases de exposición se muestran en la *Tabla 6.2*. Todas las variables tuvieron un comportamiento similar en el pecho y en el muslo en cada clase de exposición. El flujo de calor medio analizado se situó en la parte baja del intervalo (primer y segundo cuartil) para cada zona de exposición definida.

Tabla 6.1. Valores medios de flujo de calor, tiempo de exposición y factor de atenuación del traje de protección (media  $\pm$  SD [rango]).

	Flujo ( $W \cdot m^{-2}$ )	Flujo máximo ( $W \cdot m^{-2}$ )	Tiempo exposición (min)	Exposición/extinción (%)	Atenuación (%)
Muslo exterior	561.2 $\pm$ 394.0* (93.5 – 1586.6)	5922.4 $\pm$ 4202.5* (8275.5 – 13075.3)	82.9 $\pm$ 62.1*† (7.5 – 201.6)	56.9 $\pm$ 33.7*† (3.4 – 100)	72.1 $\pm$ 9.6‡ (46.3 – 87.4)
Muslo interior	315.0 $\pm$ 385.0 (35.0 – 1502.0)	2343.5 $\pm$ 2767.8 (247.3 – 8912.1)	57.2 $\pm$ 57.4# (5.0 – 179.8)	34.1 $\pm$ 26.7# (2.6 – 99.2)	
Pecho exterior	598.8 $\pm$ 618.1* (31.6 – 1808.0)	6106.5 $\pm$ 5575.0* (788.4 – 13777.7)	64.3 $\pm$ 56.8* (4.5 – 185.5)	36.4 $\pm$ 23.7* (6.6 – 86.8)	59.4 $\pm$ 14.7 (31.3 – 87.3)
Pecho interior	413.9 $\pm$ 378.8 (34.0 – 1199.0)	3489.8 $\pm$ 3690.5 (182.4 – 10315.3)	40.4 $\pm$ 57.5 (0.5 – 194.6)	19.0 $\pm$ 22.4 (0.6 – 84.6)	
Promedio muslo	438.2 $\pm$ 317.0 (69.4 – 1154.1)	4132.9 $\pm$ 3149.9 (553.0 – 10444.2)	70.0 $\pm$ 56.6‡ (15.1 – 186.8)	45.5 $\pm$ 26.8‡ (7.9 – 100)	
Promedio pecho	506.2 $\pm$ 460.6 (46.4 – 1467.6)	4798.1 $\pm$ 4414.6 (527.3 – 11546.5)	51.9 $\pm$ 54.1 (3.2 – 188.3)	27.7 $\pm$ 20.4 (5.1 – 81.9)	67.0 $\pm$ 7.7 (54.3 – 82.0)
Promedio total	472.3 $\pm$ 350.8 (71.1 – 1120.0)	4465 $\pm$ 3597.0 (798.2 – 10739.7)	61.0 $\pm$ 53.8 (13.2 – 187.5)	36.6 $\pm$ 21.0 (9.7 – 81.5)	

\*: diferencias con el sensor interior de la misma zona ( $p < 0.05$ ). †: diferencias con el pecho exterior ( $p < 0.05$ ). #: diferencias con el pecho interior ( $p < 0.05$ ). ‡: diferencias con el pecho ( $p < 0.05$ ).

El flujo de calor, el tiempo de exposición, la dosis de radiación térmica y la variable probit (Y) fueron similares para cada clase de exposición en cada tarea analizada.

El promedio ponderado del flujo de calor fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) durante la realización de contrafuego ( $1030.1 \pm 1423.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [0, 3002.0]) (*Tabla 6.4*) respecto al analizado en ataque directo ( $656.8 \pm 433.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [421.1, 892.5]) (*Tabla 6.3*), remate ( $251.2 \pm 268.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [52.6, 449.8]) (*Tabla 6.5*) y vigilancia ( $205.5 \pm 98.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [126.8, 284.2]) (*Tabla 6.6*).

Al analizar el peso relativo de cada tarea respecto a la duración total de la extinción, el ataque directo resultó significativamente mayor ( $p < 0.05$ ), representando un  $61.9 \pm 30.9\%$  del tiempo de extinción, mientras que el contrafuego, remate y vigilancia supusieron un  $21.9 \pm 15.6$ ,  $37.4 \pm 10.7$  y  $33.7 \pm 9.8\%$ , respectivamente.

El mayor valor de dosis de exposición térmica se alcanzó durante el ataque directo, con un valor medio de  $107.4 \pm 35.3 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$  en el umbral 4 (*Tabla 6.3*). La variable probit (Y) tuvo un valor de 1.9, por lo que la probabilidad de daño se mantuvo en el 0%.

Durante la realización del remate (*Tablas 6.5*) y vigilancia (*Tabla 6.6*) no se registraron valores por encima de  $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en ninguno de los incendios analizados, por lo que no se alcanzó el umbral de quemaduras de primer grado (*i.e.*,  $86 < \text{TDU} < 103 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$ ).

Tabla 6.2. Valores promedio de flujo de calor, tiempo de exposición dosis de calor recibida y probabilidad de quemaduras de primer grado, para los sensores interiores en función de los umbrales de exposición (media  $\pm$  SD [rango]).

	Muslo	Pecho	Promedio	
Clase 1 ( $q \leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	178.9 $\pm$ 114.2 (35.0 – 363.3)	207.5 $\pm$ 140.2 (34.0 – 456.8)	189.2 $\pm$ 103.9 (35.8 – 350.9)
	Tiempo exposición (min)	59.4 $\pm$ 56.3 (1.0 – 177.8)	45.6 $\pm$ 41.3 (0.5 – 194.6)	51.2 $\pm$ 44.2 (7.3 – 183.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> ·s	0.6 $\pm$ 0.5 (0.1 – 1.5)	0.8 $\pm$ 0.6 (0.1 – 1.9)	0.7 $\pm$ 0.4 (0.1 – 1.4)
	Variable probit (Y)	-17.2 $\pm$ 3.4 (-22.6 – -11.8)	-16.9 $\pm$ 4.0 (-22.7 – -12.2)	-17.1 $\pm$ 3.1 (-22.4 – -13.7)
	Número de incendios	17	18	
Clase 2 ( $1000 < q \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	1589.6 $\pm$ 341.6 (1132.6 – 2110.4)	1860 $\pm$ 479.0 (1081.0 – 2578.3)	1740.5 $\pm$ 427.2 (1106.8 – 2578.3)
	Tiempo exposición (min)	15.1 $\pm$ 12.4 (0.9 – 89.1)	8.4 $\pm$ 6.1 (0.1 – 37.6)	14.1 $\pm$ 12.7 (0.2 – 89.1)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> ·s	9.6 $\pm$ 2.9 (6.0 – 14.3)	12.0 $\pm$ 4.1 (5.6 – 18.3)	10.9 $\pm$ 3.6 (5.7 – 18.3)
	Variable probit (Y)	-5.6 $\pm$ 0.7 (-6.7 – -4.6)	-5.1 $\pm$ 1.0 (-6.9 – -3.7)	-5.3 $\pm$ 0.9 (-6.8 – -3.7)
	Número de incendios	9	10	
Clase 3 ( $5000 < q \leq 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	5596.7 $\pm$ 250.1 (5378.8 – 5869.8)	5708.0 $\pm$ 406.4 (5157.1 – 6484.3)	5659.4 $\pm$ 242.8 (5378.8 – 6011.4)
	Tiempo exposición (min)	0.6 $\pm$ 0.2 (0.1 – 0.8)	0.7 $\pm$ 0.5 (0.1 – 4.2)	0.6 $\pm$ 0.5 (0.1 – 4.2)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> ·s	49.8 $\pm$ 3.0 (847.1 – 53.1)	51.1 $\pm$ 4.9 (44.6 – 60.5)	50.5 $\pm$ 2.9 (47.1 – 54.8)
	Variable probit (Y)	-0.3 $\pm$ 0.2 (-0.4 – -0.1)	-0.2 $\pm$ 0.3 (-0.6 – -0.4)	-0.2 $\pm$ 0.2 (-0.4 – -0.3)
	Número de incendios	3	8	
Clase 4 ( $q < 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	9386	9850.8 $\pm$ 2954.9 (7390.5 – 13128.3)	9724.6 $\pm$ 2423.8 (7390.5 – 13128.3)
	Tiempo exposición (min)	0.3	1.4 $\pm$ 1.2 (0.1 – 3.9)	1.1 $\pm$ 1.0 (0.1 – 3.9)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> ·s	99.3	107.4 $\pm$ 42.9 (72.0 – 155.1)	107.4 $\pm$ 35.3 (72.0 – 155.1)
	Variable probit (Y)	1.8	1.9 $\pm$ 1.2 (0.9 – 3.2)	1.9 $\pm$ 1.0 (0.9 – 3.2)
	Número de incendios	1	4	

q, flujo de calor.

Tabla 6.3. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición durante la realización del ataque directo (media  $\pm$  SD [rango]).

	Muslo	Pecho	Promedio
Clase 1 ( $q \leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	187.0 $\pm$ 146.5 (14.0 – 475.0)	216.5 $\pm$ 150.7 (34.0 – 456.8)
	Tiempo exposición (min)	29.9 $\pm$ 21.3 (2.4 – 71.1)	23.6 $\pm$ 22.2 (1.6 – 62.3)
	Exposición/ extinción (%)	22.1 $\pm$ 17.1 (0.2 – 59.0)*	11.3 $\pm$ 11.2 (0.2 – 40.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> -s	0.7 $\pm$ 0.6 (0.1 – 2.0)	0.8 $\pm$ 0.7 (0.1 – 2.0)
	Variable probit (Y)	-17 $\pm$ 4.7 (-24.5 – -80)	-16.7 $\pm$ 3.9 (-22.7 – -11.8)
	17	18	
Clase 2 ( $1000 < q \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	1691.4 $\pm$ 559.6 (1141.0 – 2983.4)	1938.1 $\pm$ 438.6 (1177.0 – 2578.3)
	Tiempo exposición (min)	7.8 $\pm$ 7.8 (1.3 – 20.0)	10.6 $\pm$ 10.6 (3.0 – 30.4)
	Exposición/ extinción (%)	5.3 $\pm$ 5.3 (0.6 – 13.7)	4.1 $\pm$ 3.7 (0.1 – 10.1)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> -s	10.6 $\pm$ 5.0 (6.0 – 22.4)	12.8 $\pm$ 3.8 (6.2 – 18.3)
	Variable probit (Y)	-4.7 $\pm$ 2.3 (-6.6 – -0.7)	-4.9 $\pm$ 0.9 (-6.5 – -3.67)
	9	9	
Clase 3 ( $5000 < q \leq 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	5596.7 $\pm$ 250.1 (5378.8 – 5869.8)	5717.0 $\pm$ 424.7 (5157.1, 6547.6)
	Tiempo exposición (min)	0.2 $\pm$ 0.2 (0.1 – 0.5)	0.7 $\pm$ 0.5 (0.1, 4.2)
	Exposición/ extinción (%)	0.1 $\pm$ 0.1 (0.01 – 0.3)	0.3 $\pm$ 0.3 (0.04, 1.4)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> -s	49.8 $\pm$ 3.0 (47.1 – 53.1)	51.2 $\pm$ 5.1 (44.5, 61.3)
	Variable probit (Y)	-0.2 $\pm$ 0.2 (-0.3 – -0.1)	-0.2 $\pm$ 0.3 (-0.6, 0.4)
	3	8	
Clase 4 ( $q < 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )		9850.0 $\pm$ 2954.9 (7390.5 – 13128.3)
	Tiempo exposición (min)		1.4 $\pm$ 1.1 (0.1 – 3.9)
	Exposición/ extinción (%)		0.5 $\pm$ 0.5 (0.1 – 1.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>4/3</sup> -s		107.4 $\pm$ 42.9 (72.0 – 155.1)
	Variable probit (Y)		1.9 $\pm$ 1.2 (0.9 – 3.2)
		3	

q, flujo de calor. \*: diferencias con el pecho ( $p < 0.05$ ).

Tabla 6.4. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición durante la realización del contrafuego (media  $\pm$  SD [rango]).

	Musio	Pecho	Promedio
Clase 1 ( $q \leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	232.0 $\pm$ 294.1 (24.0 – 440.0)	216.2 $\pm$ 272.1 (23.7 – 408.6)
	Tiempo exposición (min)	5.1 $\pm$ 1.6 (4.0 – 6.3)	11.4 $\pm$ 8.5 (5.3 – 17.4)
	Exposición/ extinción (%)	1.3 $\pm$ 0.5 (0.9 – 1.6)	2.7 $\pm$ 1.8 (1.4 – 4.0)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> -s	1.0 $\pm$ 1.3 (0.04 – 1.9)	0.8 $\pm$ 1.1 (0.04 – 1.6)
	Variable probit (Y)	-18.7 $\pm$ 8.6 (-23.9 – 11.7)	-18.3 $\pm$ 7.6 (-23.7 – -13.0)
	Número incendios	2	2
Clase 2 ( $1000 < q \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	2025.9	2191.6
	Tiempo exposición (min)	4.8	3.5
	Exposición/ extinción (%)	1.2	0.9
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> -s	13.3	14.8
	Variable probit (Y)	-4.7	-4.4
	Número incendios	1	1
Clase 3 ( $5000 < q \leq 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	6415.1	6415.1
	Tiempo exposición (min)	0.2	0.2
	Exposición/ extinción (%)	0.1	0.1
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> -s	59.7	59.7
	Variable probit (Y)	0.3	0.3
	Número incendios	1	1

$q$ , flujo de calor.

Tabla 6.5. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición durante la realización del remate (media  $\pm$  SD [rango]).

	Muslo	Pecho	Promedio	
Clase 1 ( $q \leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$155.0 \pm 110.0$ (24.9 – 285.2)	$173.4 \pm 149.4$ (12.6 – 339.9)	$160.5 \pm 117.8$ (12.6 – 268.7)
	Tiempo exposición (min)	$51.9 \pm 38.7$ (0.8 – 114.6)	$34.1 \pm 33.6$ (0.7 – 85.3)	$48.7 \pm 38.4$ (9.0 – 114.6)
	Exposición/ extinción (%)	$25.0 \pm 19.3$ (0.8 – 52.1)	$15.0 \pm 12.3$ (0.4 – 37.1)	$10.2 \pm 9.4$ (0.1 – 42.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> ·s	$0.5 \pm 0.4$ (0.04 – 1.0)	$0.6 \pm 0.6$ (0.1 – 1.4)	$0.6 \pm 0.4$ (-18.2 – 4.5)
	Variable probit (Y)	$-17.9 \pm 4.6$ (-24.8 – -12.4)	$-19.1 \pm 5.7$ (-26.3 – -13.0)	$-18.2 \pm 4.5$ (-24.6 – -13.4)
Número incendios	6	6		
Clase 2 ( $1000 < q \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$1461.9 \pm 366.3$ (1043.7 – 1725.0)	1812	$1476 \pm 382.0$ (1047.7 – 1769.0)
	Tiempo exposición (min)	$90. \pm 7.9$ (0.1 – 18.0)	11.8	$7.5 \pm 10.5$ (0.1 – 15.0)
	Exposición/ extinción (%)	$6.2 \pm 5.7$ (0.1 – 12.3)	8.1	$6.2 \pm 8.7$ (0.1 – 12.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> ·s	$7.9 \pm 2.3$ (5.3 – 9.8)	7.6	$7.7 \pm 6.8$ (5.5 – 9.2)
	Variable probit (Y)	$-6.1 \pm 0.8$ (-7.0 – -5.5)	-6.2	$-6.29 \pm 0.8$ (-7.0 – -5.5)
Número incendios	3	1		

q, flujo de calor.

Tabla 6.6. Flujo de calor, tiempo de exposición, dosis recibida y probabilidad de daño en los diferentes umbrales de exposición durante la realización de la vigilancia (media  $\pm$  SD [rango]).

	Muslo	Pecho	Promedio	
Clase 1 ( $q \leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	150.6 $\pm$ 85.8 (45.1 – 254.5)	193.7 $\pm$ 94.0 (69.4 – 279.2)	174.7 $\pm$ 75.9 (57.3 – 254.5)
	Tiempo exposición (min)	31.1 $\pm$ 43.0 (1.6 – 106.8)	21.6 $\pm$ 15.4 (2.9 – 44.2)	24.1 $\pm$ 26.3 (2.9 – 75.5)
	Exposición/ extinción (%)	12.7 $\pm$ 13.9 (0.4 – 35.6)	8.4 $\pm$ 5.5 (1.6 – 14.7)	10.2 $\pm$ 0.3 (1.5 – 25.2)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> -s	0.5 $\pm$ 0.3 (0.4 – 0.89)	0.7 $\pm$ 0.4 (0.2 – 1.1)	0.6 $\pm$ 0.3 (0.2 – 0.9)
	Variable probit (Y)	-16.9 $\pm$ 3.0 (-20.6 – -12.9)	-16.6 $\pm$ 1.9 (-19.6 – -15.3)	-16.5 $\pm$ 2.4 (-20.1 – -12.9)
	Número incendios	5	5	5
Clase 2 ( $1000 < q \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Flujo calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	1271.8 $\pm$ 318.8 (1046.3 – 1497.2)	1355.9 $\pm$ 335.6 (1152.8 – 1743.3)	1294 $\pm$ 26.3 (2.9 – 75.5)
	Tiempo exposición (min)	0.3 $\pm$ 0.2 (0.2 – 0.5)	3.2 $\pm$ 3.2 (0.8 – 7.1)	20. $\pm$ 1.7 (0.5 – 3.8)
	Exposición/ extinción (%)	0.1 $\pm$ 0.1 (0.1 – 0.2)	1.3 $\pm$ 1.0 (0.3 – 2.4)	0.9 $\pm$ 0.6 (0.2 – 1.3)
	Dosis ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) <sup>43</sup> -s	7.0 $\pm$ 2.4 (5.3 – 8.8)	7.6 $\pm$ 2.6 (6.1 – 10.6)	7.2 $\pm$ 1.0 (6.1 – 8.0)
	Variable probit (Y)	-6.49 $\pm$ 0.9 (-7.0 – -5.7)	-6.1 $\pm$ 0.9 (-6.6 – -5.0)	-6.3 $\pm$ 0.3 (-6.6 – -6.0)
	Número incendios	2	3	3

q, flujo de calor.

La temperatura del ambiente de trabajo (*Tabla 6.7*) resultó significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) que la temperatura ambiental de la zona del incendio ( $32.6 \pm 8.9$  °C [28.7, 36.5] vs.  $24.6 \pm 8.9$  °C [22.1, 27.1]). Las temperaturas registradas en el ataque directo ( $32.3 \pm 5.7$  [29.8, 34.8]), contrafuego ( $33.5 \pm 2.3$  [22.1, 27.1]), remate ( $34.3 \pm 13.8$  °C [24.7, 43.9]) y vigilancia ( $30.3 \pm 4.7$  °C [27.0, 33.6]) fueron similares. Sin embargo, las temperaturas máximas durante la realización del ataque directo ( $73.8 \pm 23.7$  °C [63.1, 84.5]) y contrafuego ( $80.6 \pm 17.3$  °C [61.0, 97.9]) fueron significativamente más elevadas ( $p < 0.05$ ) que durante la vigilancia ( $36.6 \pm 5.5$  °C [32.8, 40.4]).

Tabla 6.7. Valores de temperatura en el ambiente de trabajo, según el tipo de tarea realizada (media  $\pm$  SD [rango]).

	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)
Ataque directo	$32.3 \pm 5.7$ (22.7 – 42.4)	$73.8 \pm 23.7^*$ (35.8 – 123.0)
Contrafuego	$33.5 \pm 2.3$ (32.2 – 36.1)	$80.6 \pm 17.3^*$ (68.2 – 100.4)
Remate	$34.3 \pm 4.7$ (21.9 – 66.3)	$54.4 \pm 29.7$ (24.9 – 99.1)
Vigilancia	$30.3 \pm 4.7$ (22.3 – 38.7)	$36.6 \pm 5.5$ (24.9 – 42.4)
Promedio	$32.6 \pm 8.9$ (22.4 – 66.3)	$78.0 \pm 23.2$ (35.8 – 123.0)

\*: diferencias con la vigilancia ( $p < 0.05$ ).

La *Figura 6.3* muestra el comportamiento del flujo de calor y la temperatura del ambiente térmico durante la extinción de uno de los incendios más intensos registrados. Desde el comienzo de la extinción hasta el minuto 30 se realizó la vigilancia y la preparación de la táctica de extinción. Entre los minutos 30 y 90 se realizó ataque directo empleando mochila extintora y

batefuegos en matorral (*i.e.*, modelo de combustible 5). Desde el minuto 90 hasta el final de la extinción (minuto 160), se realizaron labores de vigilancia. El comportamiento del flujo de calor fue altamente variable con rápidas oscilaciones temporales. Durante el incendio se observaron pulsos sucesivos de incremento del flujo de calor seguidos de fases de enfriamiento. La temperatura ambiental siguió la misma tendencia pero con un retraso que osciló entre 1-3 min respecto al comportamiento del flujo de calor.

Al comienzo del ataque directo se registró el pico máximo de flujo de calor exterior ( $13777 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), seguido con una diferencia de 2 min del pico máximo de temperatura ( $60.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Durante el ataque directo se registraron dos pulsos más de exposición a flujo de calor seguidos de los respectivos incrementos de la temperatura ambiental.

El análisis de la exposición en términos de probabilidad de daño se realizó empleando el flujo de calor recibido en los sensores dentro del traje de protección. Interiormente este incendio supuso un tiempo total de exposición efectiva a flujo de calor de 62 min, de los que 54 min (88% del tiempo exposición) fueron de la Clase 1 con un valor de flujo de calor de  $225.4 \pm 199.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (rango, 0 – 993.0). La Clase 2 supuso un total de 7 min (11% tiempo exposición) con un flujo de calor medio de  $2421.5 \pm 913.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (rango, 1069.1 – 4831.0). La Clase de exposición 3 tuvo una duración de 1 min (1% tiempo exposición) con un flujo de calor de  $5953.5 \pm 604.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (rango, 5270.9 – 6742.0), mientras que la Clase de exposición 4 supuso un tiempo de 15 s (0.3% tiempo exposición) con un flujo de calor de  $7876.8 \pm 885.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (rango, 7139.4 – 8559.3).

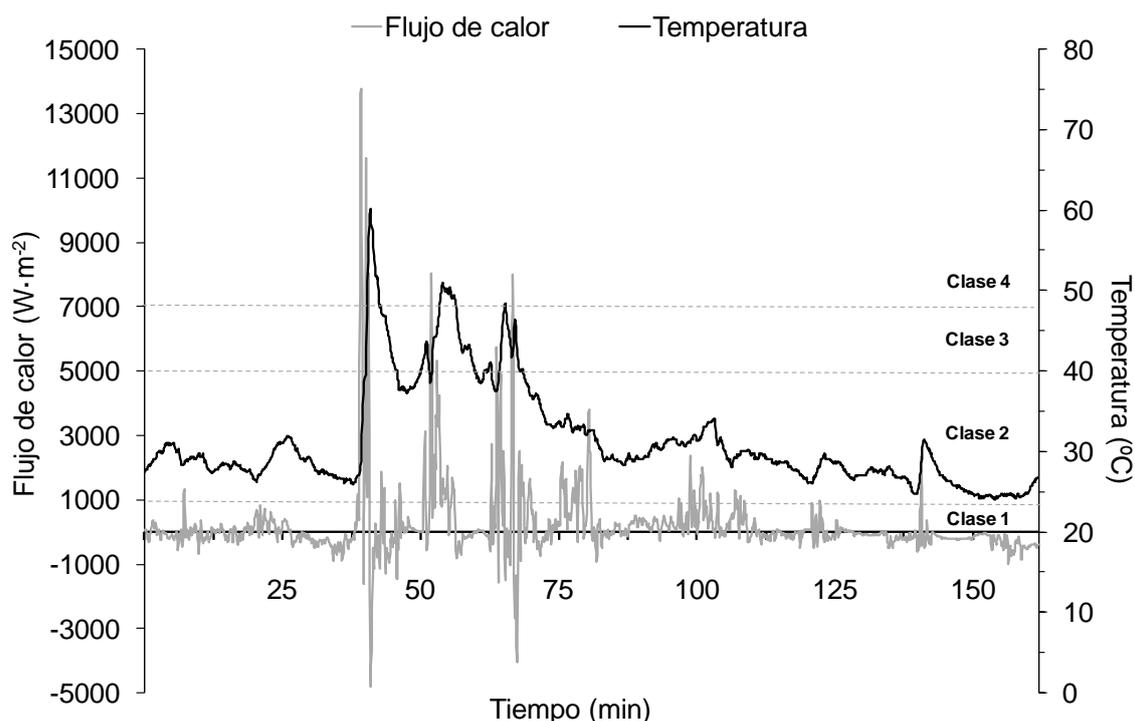


Figura 6.3. Comportamiento del flujo de calor y la temperatura ambiental registrados en la zona del pecho exterior durante un incendio de exposición intensa (Lena, Asturias, 21/08/2015). Clase 1: flujo de calor  $\leq 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 2  $1000 < \text{flujo de calor} \leq 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 3:  $5000 < \text{flujo de calor} \leq 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Clase 4: flujo de calor  $> 7000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## 6.4. DISCUSIÓN

Las condiciones ambientales analizadas durante la extinción de incendios forestales resultan en momentos puntuales intensas, con niveles de flujo de calor y temperaturas similares a los descritos en bomberos de estructuras.

Sin embargo, la carga térmica global de los incendios se redujo de manera acentuada por la larga duración de los mismos. Este hecho conlleva la existencia frecuente de momentos de muy baja exposición. A pesar de ello, el ambiente térmico analizado supone una ganancia neta de calor que incrementa el estrés térmico al que se ven sometidos los bomberos forestales durante la realización de su trabajo.

Los resultados obtenidos muestran globalmente un ambiente térmico ligero con un flujo de calor medio de  $471 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y una temperatura ambiental de  $32.6 \text{ }^\circ\text{C}$  que suponen una carga térmica similar a la de un día cálido de verano (Budd et al., 1997b; Rossi, 2003). Nuestros resultados muestran una amplia variabilidad en los valores de flujo de calor y temperatura analizados. Se encontraron valores máximos más elevados que los descritos anteriormente por Budd et al. (1997b). Estos autores describieron un rango de exposición al flujo de calor radiante que osciló entre  $700$  y  $8600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  con temperaturas ambientales de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $19 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Las diferencias observadas podrían deberse a las diferencias metodológicas entre estudios. Los incendios forestales son un fenómeno altamente variable (Zárate et al., 2008) por lo que cambios en el tipo de combustible, la topografía o las condiciones meteorológicas suponen un comportamiento diferente del fuego y por lo tanto una tasa de emisión de calor altamente variable. Los datos del estudio de Budd et al. (1997b) fueron tomados en quemas controladas donde el tipo de combustible y la topografía fueron similares, por lo que la tasa de emisión de calor del incendio fue similar. Nuestros datos, sin embargo, se registraron en escenarios reales, lo que provocó que los bomberos se enfrentaran a incendios con diferentes características en cuanto a su intensidad y duración. Por ello, las estrategias seleccionadas para su extinción y el tipo de trabajo realizado fue diferente en cada uno de los incendios.

El tipo de trabajo realizado y por lo tanto la posición relativa del personal de extinción respecto al frente de llamas condicionan la cantidad de calor recibido, ya que el flujo de calor es proporcional a la distancia de la fuente emisora (Butler

y Cohen, 1998; Zárata et al., 2008; Raimundo y Figueiredo, 2009). En el trabajo de Budd et al. (1997b) el modo predominante de extinción fue la apertura de línea de defensa a una distancia de entre 3 y 15 m de las llamas, realizando ataque directo de manera puntual. Sin embargo, en este estudio el ataque directo supuso el 62% del tiempo de extinción, por lo que el flujo de calor y la temperatura ambiental alcanzaron valores máximos más elevados (Rossi, 2003). Además, la toma de datos se realizó de manera continua durante la extinción, mientras que en los trabajos previos (Budd et al., 1997b) se registró el flujo de calor de manera puntual coincidiendo con los momentos de máxima exposición, lo que podría haber reducido la variabilidad de la exposición en comparación con nuestros resultados.

Otros factores relacionados con el método de medición de la exposición ambiental podrían haber influido en las diferencias analizadas. Varios estudios han informado que analizar la exposición térmica mediante sensores fijos no resulta fiable ya que no definen las condiciones reales experimentadas por los bomberos (Rossi, 2003; Eglin et al., 2004, Willi et al., 2016). En este sentido, los estudios previos realizados en bomberos forestales (Budd et al., 1997b) han registrado los datos ambientales mediante sensores fijos colocados en la zona de trabajo. Esta circunstancia no contemplaría los cambios del ambiente térmico en la zona cercana al bombero o incluso en su ropa de protección (Eglin et al., 2004). Willi et al. (2016) señalaron como fuente de variabilidad del flujo de calor el enfriamiento intermitente debido al cambio de posición de los bomberos hacia zonas donde la exposición es menos intensa. Estos autores analizaron el ambiente térmico mediante sensores colocados sobre EPI de los bomberos. De un modo análogo, en incendios forestales los bomberos regulan su exposición, realizando

pequeñas pausas intermitentes alejándose del fuego, con el fin de reducir el almacenamiento de calor y controlar la intensidad del esfuerzo realizado (Budd et al., 1997; Rodríguez-Marroyo et al., 2011). Este hecho, pudo contribuir especialmente a la variabilidad y discontinuidad de la exposición al flujo de calor analizada en el presente estudio.

Los datos de flujo de calor obtenidos, muestran un claro predominio de las zonas de exposición más bajas (*Tabla 2*). El 77% del tiempo de exposición, el flujo de calor recibido fue  $\sim 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Clase 1), mientras que el 21% del tiempo de exposición el flujo incidente fue de  $\sim 1700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Clase 2). Estos tiempos de exposición contrastan con los reportados por Willi et al. (2016) en bomberos de estructura. Estos autores analizaron una exposición más intensa y homogénea, ya que se alcanzaron valores medios de flujo de calor de  $1600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $1000\text{-}2400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y los bomberos permanecieron tiempos similares en todas las zonas de exposición que se analizaron. Posiblemente, las diferencias metodológicas entre ambos estudios podrían haber condicionado este comportamiento. El estudio de Willi et al. (2016) se realizó en exposiciones simuladas de muy corta duración ( $\sim 11$  min) durante la realización de simulaciones de entrenamiento, lo que pudo favorecer la homogeneidad de la exposición y la obtención de valores medios más elevados frente a los datos observados en este estudio.

Los valores máximos de flujo de calor analizados en nuestro estudio ( $\sim 5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) indicarían que la exposición fue severa (Clase III), según la clasificación empleada para caracterizar el ambiente térmico en bomberos de estructura (Krasny et al, 1981; Foster y Roberts, 1994; Rossi, 2003; Willi et al., 2016). De hecho, en 7 de los 18 incendios analizados, los valores máximos

absolutos de flujo de calor estuvieron por encima de  $10000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , lo que se considera como una exposición peligrosa (Rossi, 2003; Willi et al., 2016). Sin embargo, los valores por encima de  $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  se alcanzaron de manera puntual (<2% del tiempo de exposición) (*Tabla 2*), mientras que en bomberos de estructura los flujos de calor entre  $2000$  y  $10000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  suponen el ~30% del tiempo de exposición (Willi et al., 2016). De este modo, la exposición térmica a la que se ven sometidos los bomberos forestales resulta claramente inferior a la de los bomberos de estructura.

Contrariamente a lo esperado, el flujo de calor recibido durante la realización de contrafuego ( $1030 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) al analizado durante la realización del ataque directo ( $656.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). En términos absolutos durante el ataque directo se alcanzaron valores máximos de exposición más elevados (~9000 vs. ~6500  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), sin embargo, el ataque directo conllevó una mayor permanencia por debajo del Umbral 1 de flujo de calor, por lo que el valor medio de la exposición se vio reducido.

Por otro lado, las diferencias analizadas en el tiempo de exposición al flujo de calor entre el sensor del pecho y el del muslo durante el ataque directo (*Tabla 6.2*) y en el análisis global de la exposición (*Tabla 6.1*), sugieren una cierta asimetría en el modo en el que se recibe el flujo de calor. Los resultados obtenidos indican que el flujo de calor se recibe durante más tiempo en la zona del muslo, probablemente esta circunstancia esté relacionada con el tipo de trabajo desarrollado durante la extinción. Los bomberos realizan principalmente el ataque directo cuando trabajan cerca de llamas de entre 1-1.5 m de altura, y cuando hacen un trabajo de liquidación-remate de los rescoldos y pequeños focos

en la fase final del incendio. Esto supone que la parte inferior del cuerpo esté expuesta durante más tiempo al flujo de calor incidente lo que aumentaría el tiempo de exposición del sensor del muslo.

Las temperaturas máximas alcanzadas en cada una de las tareas analizadas confirman los resultados obtenidos de flujo de calor. Durante la realización de contrafuego y en el ataque directo los sujetos se ven expuestos a una mayor temperatura máxima respecto a la vigilancia, que es la tarea donde se registró la menor exposición térmica. Estos resultados son consistentes con el comportamiento de los bomberos durante la extinción, ya que tanto el ataque directo como el contrafuego suponen trabajar cerca de las llamas.

Rodríguez-Marroyo et al. (2011) observaron el mismo comportamiento en las temperaturas medias y máximas analizadas en incendios reales durante el ataque directo e indirecto en bomberos forestales. Sin embargo, la magnitud de los valores de temperatura observados, fueron inferiores a los analizados en este trabajo. Posiblemente, este hecho se relacione con la mayor sensibilidad de los instrumentos de medida de nuestro estudio. Las temperaturas máximas registradas en este estudio fueron inferiores a las temperaturas medias reportadas en bomberos de estructuras (Rossi, 2003; Willi et al., 2016). Esto resalta el hecho de que la temperatura ambiental en incendios de estructuras es significativamente más elevada que en incendios forestales, ya que los incendios forestales suceden a cielo abierto, por lo que la carga energética aportada por las llamas se ve rápidamente dispersada en la atmósfera (Arnaldos et al, 2004).

Durante el ataque directo se alcanzó la máxima dosis de radiación térmica (TDU),  $107.4 \pm 35.3 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$ . Este valor se encuentra dentro del

rango de dosis susceptible de producir quemaduras de primer grado (*i.e.*,  $80 < \text{TDU} < 130 \text{ (kW} \cdot \text{m}^{-2})^{4/3} \cdot \text{s}$ ) (Hockey y Rew, 1996). Sin embargo, el valor de la variable probit (Y) asociado fue de 1.9, inferior al valor umbral de probabilidad de 2.67 a partir del cual el riesgo se materializaría en daños a los sujetos expuestos. Por ello, la probabilidad de daño analizada fue del 0%. La mayor dosis de radiación térmica obtenida fue de  $155 \text{ (kW} \cdot \text{m}^{-2})^{4/3} \cdot \text{s}$  y se registró en el incendio representado en la *Figura 6.3*. Esta dosis de radiación térmica recibida en la superficie de la piel, implicaría que el 4% de los sujetos expuestos podría sufrir quemaduras de primer grado. Sin embargo, no se reportó ninguna incidencia por quemaduras en este incendio ni en ninguno de los otros incendios analizados. El sensor se colocó en la cara interna del traje de protección por encima de la ropa interior, por lo que ésta habría reducido el flujo de calor incidente que alcanza la superficie de la piel, minimizando así el riesgo de sufrir quemaduras (Raj, 2008; Song et al., 2011).

El traje de protección supuso una atenuación del flujo de calor exterior del 67%. Este resultado está en línea con lo descrito por Raj (2008). Este autor analizó el factor de protección que supone la de ropa de uso común (*i.e.*, camiseta 100% algodón o mezcla 65% algodón y 35% poliéster) en configuraciones de una o dos capas. El factor de atenuación hallado osciló entre el 50 y el 70% en función del espesor y número de capas de tejido. Se ha demostrado que la ropa más gruesa o con un mayor número de capas supone un incremento de la atenuación del calor (Song et al., 2011). En este estudio sólo se analizó el factor de atenuación del traje sin tener en cuenta la protección añadida que supone la ropa interior. A pesar de ello, la reducción del flujo de calor proporcionada por el traje de una sola capa (*i.e.*, ~0.6 mm de espesor) fue similar al informado por Raj

(2008) para configuraciones con dos capas (*i.e.*, ~2 mm de espesor), lo que confirma que las fibras sintéticas ignífugas ofrecen un buen comportamiento protector en incendios reales.

Los valores promedio de flujo de calor y temperatura ambiental analizados en este estudio definen el ambiente térmico como ligero (Budd et al., 1997; Rossi, 2003). Sin embargo las condiciones ambientales suponen una ganancia neta de calor que obliga a aumentar la tasa de sudoración para compensar el balance térmico, lo que incrementa la carga fisiológica de los sujetos (Bruce-Low et al., 2007; Bröde et al., 2010). Budd et al., (1997b) reportaron un incremento de la tasa de sudoración de  $793 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $1027 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  (23%) para compensar una carga de calor ambiental de 216 W. La carga de calor ambiental obtenida en este estudio ( $\sim 500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) extrapolada a los datos de Budd et al. (1997) supondría incrementar la tasa de sudoración hasta alcanzar  $\sim 1400 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ . Una tasa de sudoración de esa magnitud solo podría ser mantenida durante cortos periodos de tiempo (<1h) en sujetos aclimatados (Cheuvront et al., 2010). Esta circunstancia realza la importancia que tienen las condiciones ambientales de los incendios en la respuesta fisiológica de los bomberos.



## **7. CONCLUSIONES**



## **CONCLUSIÓN PRIMERA**

Los diferentes trajes de protección analizados inducen respuestas fisiológicas similares en el PEEIF. Sin embargo, la composición de los trajes afecta a la eficiencia evaporativa y a la sensación de humedad de los sujetos. La mayor eficiencia evaporativa y confort fueron analizadas cuando los bomberos llevaron puesto el traje compuesto por una sola capa y el mayor porcentaje de viscosa (*i.e.*, traje de protección 1). Además, en este traje se analizó una menor saturación de la humedad, lo cual podría suponer una mayor protección para el PEEIF en situaciones reales, cuando tienen que trabajar cerca de las llamas.

## **CONCLUSIÓN SEGUNDA**

Es a partir de intensidades moderadas de trabajo ( $>75\%$  FC máxima o  $>60\%$   $VO_2$ ) cuando el uso del traje de protección empieza a tener un efecto significativo en la respuesta fisiológica y subjetiva del PEEIF. El incremento acentuado de la carga cardiovascular, la temperatura gastrointestinal y de la piel

así como la mayor sensación térmica observada con el uso del traje, pueden comprometer el rendimiento del PEEIF en las fases de trabajo moderado-intenso realizadas durante la extinción de los incendios.

### **CONCLUSIÓN TERCERA**

El uso del equipo de protección individual (*i.e.*, traje de protección, casco, guantes, botas de extinción de media caña, gafas, cubrecuellos y cinturón de extinción) conlleva un alto estrés térmico y cardiovascular para el PEEIF. Este hecho provoca una reducción de aproximadamente el 50% en el tiempo de tolerancia al esfuerzo de los sujetos. Bajo estas circunstancias, el rendimiento y la seguridad del personal especialista en extinción de incendios forestales podrían verse disminuidos durante las fases de trabajo más intenso que se realizan en los incendios.

### **CONCLUSIÓN CUARTA**

El traje de protección del PEEIF se comporta de manera muy efectiva en situaciones reales de extinción. La ropa de protección logró atenuar el flujo de calor exterior en aproximadamente un 70%. Este hecho realza la importancia que tiene este componente del equipo de protección en la seguridad del personal especialista en extinción de incendios forestales.

### **CONCLUSIÓN QUINTA**

El ambiente térmico analizado en los incendios forestales incrementa el estrés térmico al que se tienen que enfrentar el PEEIF durante las labores de extinción. Las tareas realizadas que suponen una mayor exposición térmica, tanto

por su magnitud como por su duración, son el contrafuego y el ataque directo. Durante la ejecución de estas tareas es donde se alcanzaron los valores de exposición térmica más elevados, que podrían llegar a producir quemaduras.



# Firefighter's Immediate Response in Live-Fire Training

Horn, Illinois Fire Service Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign, 11 Gerry...

Journal of Standards and Standards

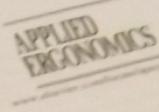
# Apparent evaporative resistance of clothing ensembles

Victor Caravita, Elizabeth A. McCullough, Camille D. Aubrey, Thomas E. Bernard

Received 11 December 2007  
© Springer-Verlag 2007

Abstract: A number of...

...evaporative resistance...  
...apparent evaporative resistance...  
...the highest apparent total evaporative resistance...  
...0.002 mPa of W<sub>cl</sub>...  
...These were followed by Tyvek 1024 and 1025 mPa of W<sub>cl</sub>...  
...and Tyvek 1427...  
...0.003 mPa of W<sub>cl</sub>...  
...methods using the progressive garment to determine...  
...relative resistance by including the effects of movement...  
...and moisture on the estimate of clothing insulation...  
...The pattern of evaporative resistance in the same as that for...  
...activity and a loose relationship between apparent...  
...clothing ensembles...



# Relationship related to ergonomics of protective clothing

George Havenith, Ronald Heugels  
Human Factors, Netherlands TNO, The Netherlands  
Ergonomics Laboratory, Leiden University, Leiden, The Netherlands  
T. Havenith, g.havenith@wpp.wvu.nl

Accepted for publication 10 June 2008, accepted 4 November 2008

...related only to standards which give requirements for...  
...modifying the design of the garment but on the...  
...the garment with effect comparable to...  
...as a whole...  
...in an example to other...  
...design...  
...of...

calculo subtrayendo  
evaporativa  
de la suma evaporativa  
does not affect  
n during exercise in

TOR, CRAIG A. BARNES, MARGARET E. ARDELT  
Laboratory, Indiana University, Bloomington, IN 47405

ABSTRACT  
...ARDELT, C. A. TORNER, and J. M. STACEY...  
...M. Stacey, Indiana Univ., 100 N. 13th St., 2000, IN 47405  
...during exercise in moderate heat by the use of clothing...

# Relative to aramid in endurance and comfort

Heinrich, Martin Faulhaber, and...



Health Research Journal  
ISSN 1744-5019  
© The Author(s) 2011  
Reprints and permissions:  
http://www.tandf.co.uk/journalsPermissions  
DOI: 10.1177/1744501911434778  
http://hrj.sagepub.com

Contents lists available at  
Applied Ergonomics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apergo

# Moisture-wicking fabric shirt on the physiological and responses during acute exercise in the heat

Christopher Cheatham, Matthew Wittbrodt  
1001 W Michigan Ave, Kalamazoo, MI 49001, USA

## abstract

This study investigated the effects that a form fitted, moisture-wicking fabric improved evaporative and ventilation properties, has on the physiological response during exercise in the heat. Ten healthy male participants completed two 45 min of exercise (50% VO<sub>2max</sub>) in a hot environment (33 °C, 60%RH). Conducted with the participant wearing a 100% cotton short sleeved t-shirt and conducted with the participant wearing a short sleeved synthetic shirt. Rectal temperature was significantly lower (P < 0.05) during exercise. Furthermore, the synthetic shirt increases the ventilation rate during exercise. The presence of the preser...

Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 10: 259-269  
ISSN 1545-9624 print / 1545-9632 online  
© 2006 JOEH, LLC  
DOI: 10.1080/15459620500498133

Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 10: 259-269  
ISSN 1545-9624 print / 1545-9632 online  
Copyright © 2006 JOEH, LLC  
DOI: 10.1080/15459620500498133

# Maximum Sustainable Work Rate for Five Protective Clothing Ensembles with Respect to Moisture Transmission Rate and Air Permeability

Nancy W. Gonzalez,<sup>1</sup> Thomas E. Bernard,<sup>1</sup> Nora L. Carroll,<sup>2</sup> Michael A. Bryner,<sup>2</sup> and James P. Zeigler<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>College of Public Health, University of South Florida, Tampa, Florida  
<sup>2</sup>Front Company, Richmond, Virginia

# Clothing Layers in Combination with Fire Protective Clothing on Physiological and Thermal Responses during Intermittent Work and on Maximum Sustainable Work Rate

Hall, Jeannie M. Hall, Fehling  
Health and Safety Laboratory  
Princeton, New York

...clothing (PPC) shielded...  
...occupational hazards; thermal...  
...and perceptual...  
...of clothing layers were...  
...near (TOG) on physiological...  
...alternating work...  
...ensembles' (PPC)...  
...are reported as...  
...age, 21 ± 0.3 yr...  
...; VO<sub>2max</sub>, 58.9...  
...maximal work rate...  
...hours (10-20...)

## RESEARCH ARTICLE

# Torso Undergarments: Their Merit for Clothed and Armored Individuals in Hot-Dry Conditions

...s Pro...  
...n Hea...  
...cted b...

To cite this article...  
Taylor & Francis...  
PLEASE SCROLL...  
Taylor & Francis...  
representations or...  
Content. Any opinions...  
should be independent...  
any losses, actions...  
or howsoever caused...  
the Content.  
This article may be used...  
reproduction, redistribu...  
form to anyone is expres...  
www.tandfonline.com/doi/10.1080/15459620500498133



1. Aguirre F. Manual de formación de incendios forestales para cuadrillas. Zaragoza: Gobierno de Aragón/ TRAGSA; 2006.
2. Aguirre F, Gómez R, López-Satué J. Los cambios socioeconómicos y de comportamiento de los incendios. Influencia y condicionantes del rendimiento. Factores correctores. En: Primer Simposio Nacional sobre Incendios Forestales. Alicante; 2008.
3. Aisbett B, Nichols B. Fighting fatigue whilst fighting bushfire: an overview of factors contributing to firefighter fatigue during bushfire suppressions. *Aust J Emergen Manage*. 2007; 22: 31-39.
4. Alvarado C, Pascual I. Riesgos físicos no comunes en la extinción de incendios forestales y su prevención con EPI adecuados. En: 4ª Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales. Sesión Temática 6. Sevilla; 2007. Disponible en: <http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/html/es/pais.html>.
5. American College of Sports Medicine (ACSM). The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc*. 1998; 30: 975-91.

6. Angerer P, Kadlez-Gebhardt S, Delius M, Raluca P, Nowak D. Comparison of Cardiocirculatory and Thermal Strain of Male Firefighters During Fire Suppression to Exercise Stress Test and Aerobic Exercise Testing. *Am J Cardiol.* 2008; 102(11): 1551–6.
7. Apud E, Meyer F, Maureira F. Ergonomía en el combate de incendios forestales. Chile: Universidad de Concepción; 2002.
8. Arnaldos Viger J, Navalón Novell X, Pastor Ferrer E, Planas Cuchi E, Zárata López L. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. 1ª Ed. Barcelona: Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona, Mundi-Prensa; 2004.
9. Arngrímsson SA, Stewart DJ, Borrani F, Skinner KA, Cureton KJ. Relation of heart rate to percent  $VO_{2peak}$  during submaximal exercise in the heat. *J Appl Physiol.* 2003; 94: 1162–68.
10. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ropas de protección para bomberos. Métodos de ensayo de laboratorio y requisitos de prestaciones para ropa forestal. UNE-EN 15614. Madrid: AENOR; 2007.
11. Astrand PO, Rodahl K. Fisiología del trabajo físico. Buenos Aires: Panamericana; 1985.
12. Austin C. Wildland firefighter health risks and respiratory protection. [Monografía en Internet]. Montreal: Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST); 2008. Report R-572. Disponible en: <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-572.pdf>.

13. Austin CC. Accurate solution of the Coburn-Fors- ter-Kane (CFK) equation using an iterative algorithm programmed into Excel spreadsheet softwa- re. New Orleans: American Industrial Hygiene Association Conference and Exhibition; 2001.
14. Baker SJ, Grice J, Roby L, Matthews C. Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*. 2000; 43: 1350–8.
15. Bannister R, Cotes J. The effect of changes in environmental temperature upon body temperature and performance during strenuous exercise. *J Physiol*. 1959; 142: 60–62.
16. Barker RL, Guerth-Schacher C, Grimes R V., Hamouda H. Effects of Moisture on the Thermal Protective Performance of Firefighter Protective Clothing in Low-level Radiant Heat Exposures. *Text Res J*. 2006; 76(1): 27–31.
17. Barnard RJ, Duncan HW. Heart rate and ECG responses of fire fighters. *J Occup Med*. 1975; 17: 247–50.
18. Barr D, Warren G, Reilly T. The thermal ergonomics of firefighting reviewed. *Appl Ergon*. 2010; 161–72.
19. Belding HS, Hatch TV. Index for evaluating heat stress in terms of the resulting physiological strains. *Heat Piping Air Cond*. 1955; 27: 129–36.
20. Borg, GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 1982; 14: 377–81.

21. Bos J, Mol E, Visser B, Frings-Dresen M. The physical demands upon (Dutch) fire-fighters in relation to the maximum acceptable energetic workload. *Ergonomics*. 2004; 47(4): 446–60.
22. Bowman DMJS, Williamson GJ, Abatzoglou JT, Kolden CA, Cochrane MA, Smith A MS. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nat. Ecol. Evol.* 2017; 1(3): 0058. doi: [10.1038/s41559-016-0058](https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058).
23. Britton C, Lynch C, Ramirez M, Torner J, Buresh C, Peek-Asa C. Epidemiology of injuries to wildland firefighters. *Am J Emer Med*. 2013; 31: 339–45.
24. Bröde P, Havenith G, Wang X, Candas V, den Hartog EA, Griefahn B, et al. Non-evaporative effects of a wet mid layer on heat transfer through protective clothing. *Eur J Appl Physiol*. 2008; 104(2): 341–9.
25. Bröde P, Kuklane K, Candas V, Den Hartog EA, Griefahn B, Holmér I, et al. Heat gain from thermal radiation through protective clothing with different insulation, reflectivity and vapour permeability. *Int J Occup Saf Ergon*. 2010; 16(2): 231–44.
26. Brotherhood JR, Budd GM, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP. Project Aquarius 3. Effects of work rate on the productivity, energy expenditure, and physiological responses of men building fireline with a rakehoe in dry eucalypt forest. *Int J Wildland Fire*. 1997; 7: 87–98.
27. Brotherhood R. Heat stress and strain in exercise and sport. *J Sci Med Sport*. 2008; 11: 6–19. doi: [10.1016/j.jsams.2007.08.017](https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.08.017).

28. Bruce RA. Exercise testing of patients with coronary artery disease. *Ann Clin Res.* 1971; 3: 323–32.
29. Bruce-Low SS, Cotterrell D, Jones GE. Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises. *Ergonomics.* 2007; 50(1): 80–98.
30. Budd GM, Brotherhood JR, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP, et al. Project Aquarius 5. Activity distribution, energy expenditure, and productivity of men suppressing free-running wildland fires with hand tools. *Int J Wildland Fire.* 1997a; 7: 105–18.
31. Budd GM, Brotherhood JR, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP, et al. Project Aquarius 6. Heat load from exertion, weather, and fire in men suppressing wildland fires. *Int J Wildland Fire.* 1997b; 7: 119–31.
32. Budd GM, Brotherhood JR, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP, et al. Project Aquarius 7. Physiological and subjective responses of men suppressing wildland fires. *Int J Wildland Fire.* 1997c; 7: 133–44
33. Budd GM, Brotherhood JR, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP, et al. Project Aquarius 13. The thermal burden of high insulation and encapsulation in wildland firefighters' clothing. *Int J Wildland Fire.* 1997d; 7: 207–18.
34. Burton AC. Human calorimetry II. The average temperature of the tissues of the body. *J Nutr.* 1935; 9: 261–80.

35. Butler B, Cohen J. Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating. *Int J Wildl Fire*. 1998; 8(2): 73.
36. Caldwell JN, Engelen L, van der Henst C, Patterson MJ, Taylor N a S. The interaction of body armor, low-intensity exercise, and hot-humid conditions on physiological strain and cognitive function. *Mil Med*. 2011; 176(5): 488–93.
37. Carballo Leyenda B, Rodríguez-Marroyo JA, López-Satuévil J, Ávila Ordás C, Pernía Cubillo R, Gerardo Villa Vicente J. Exposición al monóxido de carbono del personal especialista en extinción de incendios forestales. *Rev Esp Salud Publica*. 2010; 84(6): 799–807.
38. Carter JM, Rayson M, Wilkinson DM, Richmond V, Blacker S. Strategies to combat heat strain during and after firefighting. *J Thermal Biol*. 2007; 32: 109–16.
39. Chen YS, Fan J, Zhang W. Clothing thermal insulation during sweating. *Text Res J*. 2003. 73(2): 152–57.
40. Cheung SS, McLellan TM, Tenaglia S. The thermophysiology of uncompensable heat stress. Physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Med*. 2000; 29: 329–59.
41. Cheung SS, Petersen SR, McLellan TM. Physiological strain and countermeasures with firefighting. *Scand J Med Sci Sport*. 2010; 20(SUPPL. 3): 103–16.
42. Chevront SN, Kenefick RW, Montain SJ, Sawka MN. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J Appl Physiol*. 2010; 109(6): 1989–95.

43. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York: Routledge Academic; 1988.
44. Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Análisis de los riesgos en la prevención y extinción de incendios en el sector agrario.[Monografía en Internet]. 2009. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Instituto/Comision/GruposTrabajo/ficheros/DOCUMENTO%20FINAL%20SUBGRUPO%20INCENDIOS%20SECTOR%20AGRARIO.pdf>
45. Cramer MN, Jay O. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Auton Neurosci*. 2016; 196: 3–13.
46. Crandall CG, González-Alonso J. Cardiovascular function in the heat-stressed human. *Acta Physiol*. 2010; 199(4): 407–23.
47. Cuddy JS, Ham JA, Harger SG, Slivka DR, Ruby BC. Effects of an electrolyte additive on hydration and drinking behavior during wildfire suppression. *Wilderness and Environmental Medicine*. 2008; 19(3): 172–80.
48. Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *J Therm Biol*. 2014; 43(1): 7–12.
49. Cuddy JS, Sol JA, Hailes WS, Ruby BC. Work patterns dictate energy demands and thermal strain during wildland firefighting. *Wilderness Environ Med*. 2015; 26(2): 221–6.

50. DenHartog E a., Walker M a., Barker RL. Total heat loss as a predictor of physiological response in wildland firefighter gear. *Text Res J.* 2016; 86(7): 710–26.
51. Dorman LE, Havenith G. The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *Eur J Appl Physiol.* 2009; 105(3): 463–70.
52. Dreger RW, Jones RL, Petersen SR. Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics.* 2006; 49(10): 911–20.
53. DuBois D, DuBois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch. Intern. Med.* 1916. 17: 863–71.
54. Eglin CM, Coles S, Tipton MJ. Physiological responses of fire-fighter instructors during training exercises. *Ergonomics.* 2004; 47(5): 483–94.
55. Eglin CM, Tipton MJ. Can firefighter instructors perform a simulated rescue after a live fire training exercise? *Eur J Appl Physiol.* 2005; 95: 327–34.
56. Eglin, CM. Physiological responses to fire-fighting: thermal and metabolic considerations. *J Hum Environ Syst.* 2007; 10: 7–18.
57. Eisenberg NA, Lynch CJ, Breeding RJ. Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills (VM1). Rockville, MD: Coast Guard. National Technical Information Service; 1975. Report N° CG-D-137-75.

58. Ekelund LG. Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise. *Acta Physiol Scand.* 1967; 70 (Suppl 68): 5–38.
59. Ely BR, Chevront SN, Kenefick RW, Sawka MN. Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Med Sci Sports Exerc.* 2010; 42(1): 135–41.
60. Fahy RF, Leblanc PR, Molis JL. Firefighter Fatalities in the United States 2014. National Fire Protection Association Journal. 2015; (June). Disponible en: <http://www.nfpa.org/news-and-research/fire-statistics-and-reports/fire-statistics/the-fire-service/fatalities-and-injuries/firefighter-fatalities-in-the-united-states>.
61. Finney DJ. Probit analysis. London: Cambridge University Press; 1971.
62. Fogarty A, Armstrong K, Gordon C, Groeller H, Woods B, Stocks J, et al. Cardiovascular and thermal consequences of protective clothing: a comparison of clothed and unclothed states. *Ergonomics.* 2004; 47(10): 1073–86.
63. Fogarty LG. 1996. Two rural/urban interface fires in the Wellington suburb of Karori: assessment of associated burning conditions and fire control strategies. Rotorua, New Zealand: New Zealand Forest Research Institute and National Rural Fire Authority; 1996. Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series, Report. No. 1.
64. Fontana P, Saiani F, Grütter M, Croset J-P, Capt A, Camenzind M, et al. Exercise intensity dependent relevance of protective textile properties for human thermo-physiology. *Text Res J.* 2016; 87(12): 425–34. doi: [org/10.1177/0040517516654105](https://doi.org/10.1177/0040517516654105).

65. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res.* 2001; 15: 109–15.
66. Foster JA, Roberts GV. Measurements of Firefighting Environment. Wetherby, UK: Central Fire Brigades Advisory Council, Joint Committee on Fire Research. 1994. Research Report 61.
67. Frankman D, Webb BW, Butler BW, Jimenez D, Forthofer JM, Sopko P, et al. Measurements of convective and radiative heating in wildland fires. *Int J Wildl Fire.* 2013; 22(2): 157.
68. Gagge AP y RR. Gonzalez: Mechanisms of Heat Exchange: Biophysics and Physiology. In Handbook of Physiology: Environmental Physiology, M.J. Fregly and C.M. Blatteis (eds.). Bethesda, Md.: American Physiological Society; 1996.
69. Galloway S, Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports exerc.* 1997; 29: 1240-49.
70. Gaskill S, Ruby B, Heil D, Sharkey B, Hansen K, Lankford D. Fitness, workrates and fatigue during arduous wildfire suppression. *Med Sci Sports Exer.* 2002; 34 Suppl: 195.
71. Gaskill SE, Ruby BC, Heil DP, Sharkey B, Slivka D, Lankford E. Seasonal changes in wildland firefighters aerobic fitness. *Med Sci Sports Exerc.* 2003; 35 Suppl: 131.

- 
72. Goldman, RF. Heat stress in firefighting. *Fire Engineering*. 1990; May: 47–53.
  73. González-Alonso J, Crandall CG, Johnson JM. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol*. 2008; 586(1): 45–53.
  74. González-Alonso J, Mora-Rodríguez R, Below PR, Coyle EF. Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise. *J Appl Physiol*. 1995; 79: 1487-96.
  75. Gonzalez-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol*. 1999; 86(3): 1032–9.
  76. Griefahn B, Kunemund C, Brode P. Evaluation of performance and load in simulated rescue tasks for a novel design SCBA: effect of weight, volume and weight distribution. *Appl. Ergonomics*. 2003; 34: 157–65.
  77. Guidotti TL. Occupational mortality among firefighters: assessing the association. *J Occup Med*. 1995; 37: 1348–56.
  78. Guo Y, Yi Li, Tokura H, Wong T, Chung J, Wong ASW, et al. Impact of Fabric Moisture Transport Properties on Physiological Responses when Wearing Protective Clothing. *Text Res J*. 2008; 78(12): 1057–69.
  79. Hancock PA. Task categorization and the limits of human performance in extreme heat. *Aviat Space Environ Med*. 1982; 53: 778–84.
  80. Havenith G, Heus R. A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Appl Ergon*. 2004; 35(1): 3–20.

81. Havenith G. Heat balance when wearing protective clothing. *Ann Occup Hyg.* 1999; 43: 289–96.
82. Havenith G. Interaction of clothing and thermoregulation. *Exog Dermatology.* 2002; 1(5): 221–30.
83. Heil DP. Estimating energy expenditure in wildland fire fighters using a physical activity monitor. *Appl Ergon.* 2002; 33: 405–13.
84. Hendrie AL, Brotherhood JR, Budd GM, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP. Project Aquarius 8. Sweating, drinking, and dehydration in men suppressing wildland fires. *Int J Wildland Fire.* 1997; 7: 145–58.
85. Hendrie AL, Brotherhood JR, Budd GM, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP. Project Aquarius 8. Sweating, drinking, and dehydration in men suppressing wildland fires. *Int J Wildland Fire.* 1997; 7: 145–58.
86. Hockey S, Rew P. Review of human response to thermal radiation. Sudbury, Suffolk, UK; 1996. HSE contract research report No. 97/1996.
87. Holmér I, Gavhed D. Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads. *Appl Ergon.* 2007; 38: 45–52.
88. Holmér I, Kuklane K, Gao C. Test of firefighter's turnout gear in hot and humid air exposure. *Int J Occup Saf Ergon.* 2006; 12(3): 297–305.
89. Holmér I. Heat exchange and thermal insulation compared in woolen and nylon garments during wear trials. *Text Res J.* 1985; 55(9): 511–18.

90. Holmér I. Protective Clothing in Hot Environments. *Ind Health*. 2006; 44: 404–13.
91. Horn GP, DeBlois J, Shalmyeva I, Smith DL. Quantifying Dehydration in the Fire Service Using Field Methods and Novel Devices. *Prehospital Emerg Care*. 2012; 16(3): 347–55.
92. Hoschke BN. Standards and specifications for firefighters' clothing. *Fire Safety J*. 1981; 4: 125–37.
93. Hostler D, Gallagher Jr. M, Goss FL, Seitz JR, Reis SE, Robertson RJ, et al. The effect of hyperhydration on physiological and perceived strain during treadmill exercise in personal protective equipment. *Eur J Appl Physiol*. 2009; 105: 607–13.
94. International Standardization Organization. Protective clothing for firefighters. Laboratory test methods and performance requirements for wildland firefighting clothing. ISO 15384. Geneva: ISO; 2003.
95. International Standardization Organization. Ergonomics of the thermal environment-Determination of metabolic rate. ISO 8996. Geneva: ISO; 2004.
96. Ivy AC. What is normal or normality?. *Quart Bull Northwestern Uni Med Sch*. 1944; 18: 22-32.
97. Kales SN, Soteriades ES, Christophi CA, Christiani DC. Emergency duties and deaths from heart disease among firefighters in the United States. *New Engl J Med*. 2007; 356: 1207-15.

98. Kalimo R, Lehtonen A, Daleva M, Kuorinka I. Psychological and biochemical strain in firemen's work. *Scand J Work Environ Health*. 1980; 6: 179–87.
99. Karter M. Patterns of Firefighter Fireground Injuries. Quincy, MA: National Fire Protection Association, Fire–Analysis and Research Division; 2012.
100. Keiser C, Rossi R. Temperature Analysis for the Prediction of Steam Formation and Transfer in Multilayer Thermal Protective Clothing at Low Level Thermal Radiation. *Text Res J*. 2008; 78(11): 1025–35.
101. Kenny GP, Dorman LE, Webb P, Ducharme MB, Gagnon D, Reardon FD, et al. Heat balance and cumulative heat storage during intermittent bouts of exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2009; 41(3): 588–96.
102. Kenny GP, Gagnon D, Dorman LE, Hardcastle SG, Jay O. Heat balance and cumulative heat storage during exercise performed in the heat in physically active younger and middle-aged men. *Eur J Appl Physiol*. 2010; 109(1): 81–92.
103. Kerslake D McK. The stress of hot environments. Monographs of the physiological society n° 29. Cambridge: Cambridge University Press; 1972.
104. King AR. The efficiency of rural firefighters. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Chemical Research Laboratories.; 1962. Technical Paper No. 4.

105. Kinsman P. Major Hazard Assessment: Survey of Current Methodologies and Information Sources. Health and Safety Executive; 1991. Specialist Inspector Reports N° 29.
106. Kivimaki M, Lusa S. Stress and cognitive performance of fire fighters during smoke-diving. *Stress Med.* 1994; 10: 63–68.
107. Kofler P, Burtscher M, Heinrich D, Bottoni G, Caven B, Bechtold T, et al. Performance limitation and the role of core temperature when wearing light-weight workwear under moderate thermal conditions. *J Therm Biol.* 2015; 47: 83–90.
108. Krasny J, Rockett JA, Huang D. Protecting fire fighters exposed in room fires: Comparison of results of bench scale test for thermal protection and conditions during room flashover. *Fire Technol.* 1988; 24(1): 5–19.
109. Kwon A, Kato M, Kawamura H, Yanai Y, Tokura H. Physiological significance of hydrophilic and hydrophobic textile materials during intermittent exercise in humans under the influence of warm ambient temperature with and without wind. *Eur J Appl Physiol.* 1998; 78(6): 487–93.
110. Lafrenz AJ, Wingo JE, Ganio MS, Cureton KJ. Effect of ambient temperature on cardiovascular drift and maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc.* 2008; 40(6): 1065–71.
111. Larsen B, Snow R, Williams-Bell M, Aisbett B. Simulated Firefighting Task Performance and Physiology Under Very Hot Conditions. *Front Physiol.* 2015 Nov 9; 6: 322. doi: [10.3389/fpsyg.2015.00322](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00322).

112. Lawson LK, Crown EM, Ackerman MY, Dale JD. Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters. *Int J Occup Saf Ergon.* 2004; 10(3): 227–38.
113. Lee JY, Kim S, Jang YJ, Baek YJ, Park J. Component contribution of personal protective equipment to the alleviation of physiological strain in firefighters during work and recovery. *Ergonomics.* 2014; 57(7): 1068–77.
114. Lemon PW, Hermiston RT. The human energy cost of firefighting. *J Occ Med.* 1977; 8: 558–62.
115. Levine L, Sawka MN, Gonzalez RR. Evaluation of clothing systems to determine heat strain. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1998; 59(8): 557–62.
116. Lorenzo S, Minson CT, Babb TG, Halliwill JR. Lactate threshold predicting time trial performance: Impact of heat and acclimation. *J Appl Physiol.* 2011; 111(1): 221–27.
117. Lotens WA, Havenith G. Effects of moisture absorption in clothing on the human heat balance. *Ergonomics.* 1995; 38: 1092–1113
118. Lucía A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C. Tour de France versus Vuelta a España: Which Is Harder?. *Med Sci Sports Exerc.* 2003; 35: 872–78.
119. Mäkinen, H. Firefighter's Protective Clothing. En: *Textiles for Protection.* Ed: R. A. Scott; pp: 622–647. Cambridge: Woodhead, 2005.
120. Malchaire J, Piette A, Kampmann B, et al. Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg.* 2001; 45(2): 123–35.

121. Martínez Ruiz E. Métodos de extinción. En: Vélez Muñoz R, coordinador. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Madrid: McGraw-Hill Interamericana; 2000. p. 20.1–20.10.
122. Materna BL, Jones JR, Sutton PM, Rothman N, Harrison RJ. Occupational Exposures in California Wildland Fire Fighting. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1992; 53: 69–76.
123. McCammon JB, McKenzie L. Wildland firefighter managed carbon monoxide (CO) exposure monitoring. March (CO): U.S. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2000.
124. McLellan T, Selkirk G. Heat stress while wearing long pants or shorts under firefighting protective clothing. *Ergonomics.* 2004; 47(1): 75–90.
125. McLellan TM, Daanen HAM, Cheung SS. Encapsulated environment. *Compr Physiol.* 2013; 3: 1363–91.
126. McLellan TM, Havenith G. Protective clothing ensembles and physical employment standards. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2016; 41(6): 121–30.
127. McLellan TM, Pope JI, Cain JB, Cheung S. Effects of metabolic rate and ambient vapour pressure on heat strain in protective clothing. *Eur J Appl Physiol.* 1996; 74: 518-27.
128. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). Análisis de los datos referentes a sucesos sobre seguridad y salud de personal BRIF en la campaña de verano de 2009. [Informe técnico]. 2010.

129. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). Los incendios forestales en España decenio 2001-2010. [Informe técnico anual]. 2012. Disponible en: [http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010finalmod1\\_tcm7-349255.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010finalmod1_tcm7-349255.pdf).
130. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). Los incendios forestales en España decenio 1996-2005. [Informe técnico anual]. 2006. Disponible en: [http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/decenio\\_1996\\_2005\\_tcm7-349070.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/decenio_1996_2005_tcm7-349070.pdf).
131. Montain SJ, Baker-fulco CJ, Niro PJ, Reinert AR, Cuddy JS, Ruby BC. Efficacy of eat-on-move ration for sustaining physical activity, reaction time, and mood. *Med Sci Sports Exerc.* 2008; 40(11): 1970–6.
132. Montain SJ, Coyle EF. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *J Appl Physiol.* 1992; 73: 1340-50.
133. Montain SJ, Sawka MN, Cadarette BS, Quigley MD, McKay JM. Physiological tolerance to uncompensable heat stress: effects of exercise intensity, protective clothing, and climate. *J Appl Physiol.* 1994; 77(1): 216–22.
134. Moran DS, Shitzer A, Pandolf KB. A physiological strain index to evaluate heat stress. *Am J Physiol.* 1998; 275: R129–34.
135. Naeher LP, Brauer M, Lipsett M, Zelikoff JT, Simpson CD, Koenig JQ, et al. Woodsmoke Health Effects: A Review. *Inhal Toxicol.* 2007; 19(1): 67–106.

136. Nayak R, Houshyar S, Padhye R. Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing. *Fire Sci Rev.* 2014; 3(1): 2–19
137. Nunneley SA. Heat stress in protective clothing. Interactions among physical and physiological factors. *Scand J Work Environ Health.* 1989; 15 Suppl 1(c): 52–7.
138. Nybo L, Rasmussen P, Sawka MN. Performance in the Heat-Physiological Factors of Importance for Hyperthermia-Induced Fatigue. *Compr Physiol.* 2014; 4: 657–89. doi: [10.1002/cphy.c130012](https://doi.org/10.1002/cphy.c130012).
139. Parsons K. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance. New York: Taylor & Francis; 2003.
140. Periard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp Physiol.* 2011; 96: 134–44.
141. Petruzzello SJ, Gapin JI, Snook E, Smith DL. Perceptual and physiological heat strain: examination in firefighters in laboratory- and field-based studies. *Ergonomics.* 2009; 52(6): 747–54.
142. Phillips M, Payne W, Lord C, Netto K, Nichols D, Aisbett B. Identification of physically demanding tasks performed during bushfire suppression by Australian rural firefighters. *Appl Ergon.* 2012; 43(2): 435–41.

143. Phillips M, Petersen A, Abbiss CR, Netto K, Payne W, Nichols D, et al. Pack Hike Test finishing time for Australian firefighters: Pass rates and correlates of performance. *Appl Ergon.* 2011; 42(3): 411–8.
144. Pietersen CM. Consequences of accidental releases of hazardous material. *J Loss Prev Process Ind.* 1990; 3(1): 136–41.
145. Porrero M, Peñas L. El personal de extinción. En: Vélez Muñoz R, coordinador. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Madrid: McGraw-Hill Interamericana; 2000. p. 19.11–19.34.
146. Qian X, Fan J. A quasi-physical model for predicting the thermal insulation and moisture vapour resistance of clothing. *Appl Ergon.* 2009; 40(4): 577–90.
147. Racinais S, Alonso JM, Coutts AJ, Flouris AD, Girard O, González-Alonso J, et al. Consensus recommendations on training and competing in the heat. *Br J Sports Med.* 2015; 49(18): 1164–73.
148. Raimundo AM, Figueiredo AR. Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Saf J.* 2009; 44(4): 514–21.
149. Raines J, Snow R, Petersen A, Harvey J, Nichols D, Aisbett B. The effect of prescribed fluid consumption on physiology and work behavior of wildfire fighters. *Appl Ergon.* 2013; 44(3): 404–13.
150. Raj PK. A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. *J Hazard Mater.* 2008a; 159(1): 61–71.

- 
151. Raj PK. Field tests on human tolerance to (LNG) fire radiant heat exposure, and attenuation effects of clothing and other objects. *J Hazard Mater.* 2008b; 157(2–3): 247–59.
152. Rasch W, Samson P, Cote J, Cabanac M. Heat loss from the human head during exercise . *J Appl Physiol.* 1991; 71: 590–5.
153. Raub J, Mathieu-Nolf M, Hampson N, Thom S. Carbon monoxide poisoning: a public health perspective. *Toxicology.* 2000; 145: 1-14.
154. Rayson MP, Wilkinson DM, Carter J, Richmond V, Blacker SD, Bullock N et al. Physiological assessment of firefighting in the built up environment. Fire Research Tehcnical Report 2/2005. Wetherby, UK: ODPM Publications; 2005.
155. Reinhardt TE, Ottmar RD, Hanneman A. Smoke exposure among firefighters at prescribed burns in the Pacific Northwest. United States Departement of Agriculture Forest Service. Pacific Northwest Research Station; 2000. Research Paper 526. p. U1–45.
156. Reinhardt TE, Ottmar RD. Baseline measurements of smoke exposure among wildland firefighters. *J Occup Environ Hyg.* 2004; 1: 593–606.
157. Reisen F, Hansen D, Meyer CP.. Exposure to bushfire smoke during prescribed burns and wildfires: firefighters' exposure risks and options. *Environ. Int.* 2011; 37: 314–21.
158. Richmond VL, Rayson MP, Wilkinson DM, Carter JM, Blacker SD. Physical demands of firefighter search and rescue in ambient environmental conditions. *Ergonomics.* 2008; 51(7): 1023–31.

159. Rodríguez-Marroyo JA, García-López J, Ávila C, Jiménez F, Córdova A, Villa JG. Intensity of exercise according to topography in professional cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 2003; 35: 1209–15.
160. Rodríguez-Marroyo JA, García-López J, Villa JG, Córdova A. Adaptation of pedaling rate in profesional cyclist in mountain passes. *Eur Appl Physiol.* 2008; 103: 515–22.
161. Rodríguez-Marroyo JA, López-Satue J, Pernía R, Carballo B, García-López J, Foster C, et al. Physiological work demands of Spanish wildland firefighters during wildfire suppression. *Int Arch Occup Environ Health.* 2012; 85(2): 221–8.
162. Rodríguez-Marroyo JA, Villa JG, López-Satue J, Pernía R, Carballo B, García-López J, et al. Physical and thermal strain of firefighters according to the firefighting tactics used to suppress wildfires. *Ergonomics.* 2011; 54(11): 1101–8.
163. Rossi R. Fire fighting and its influence on the body. *Ergonomics.* 2003; 46(10): 1017–33.
164. Rowell LB, Marx HJ, Bruce RA, Conn RD, Kusumi F. Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with termal stress in normal men during exercise. *J Clin Invest.* 1966; 45: 1801–16.
165. Ruby BC, Shriver TC, Zderic TW, Sharkey BJ, Burks C, Tysk S. Total energy expenditure during arduous wildfire suppression. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34(6): 1048–54.

166. San-Miguel-Ayanz J, Durrant T, Boca R, Libertà G, Boccacci F, Di Leo M et al. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2015. Joint Research Center, European Commission; 2016. Technical Report EUR 28158 EN. [doi: 10.2788/914](https://doi.org/10.2788/914).
167. Saunders AG, Dugas JP, Tucker R, Lambert MI, Noakes TD. The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol Scand*. 2005; 183(3): 241–55.
168. Sawka M, Pandolf K. Effect of water loss on physiological function and exercise performance. En: Gisolf, C, Lamb, D, editores. Perspectives in exercise science and sports medicine. Vol. 3. Indianapolis: Benchmark Press; 1990.
169. Sawka MN, Montain S, Latzka WA. Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat. *Comp Biochem Phys A*. 2001; 128: 679–90.
170. Sawka MN, Chevront SN, Kenefick RW. Hypohydration and Human Performance: Impact of Environment and Physiological Mechanisms. *Sport Med*. 2015; 45 Suppl 1: 51–60.
171. Scarino A, Tardif R. Modélisation de l'exposition au monoxyde de carbone. Studies and Research Reports. Montreal: Institut de Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST); 2005.
172. Schlader ZJ, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T. Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*. 2011; 111(8): 1631–9.

173. Selkirk GA, McLellan TM. Influence of aerobic fitness and body fatness on tolerance to uncompensable heat stress. *J Appl Physiol*. 2001; 91: 2055–63.
174. Selkirk GA, McLellan TM. Physical Work Limits for Toronto Firefighters in Warm Environments. *J Occup Environ Hyg*. 2004; 1(4): 199–212.
175. Sharkey B, Davis PO. Hard work. Champaign, Illinois: Human Kinetics; 2008.
176. Sharkey B. Wildland firefighter health and safety report: Recommendations of the April 1999 Conference. [Monografía en Internet]. Technology and Development Program. United States Department of Agriculture Forest Service. Missoula Montana; 1999. Informe Técnico 9951-2841-MTDC. Disponible en: [https://www.fs.fed.us/eng/php/eng\\_search.php?category=Program&srchword=16](https://www.fs.fed.us/eng/php/eng_search.php?category=Program&srchword=16).
177. Sköldström B. Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics*. 1987; 30(11): 1589–97.
178. Smith DL, Fehling PC, Hultquist EM, Lefferts WK, Barr DA, Storer TW, et al. Firefighter's personal protective equipment and the chronotropic index. *Ergonomics*. 2012; 55(10): 1243–51.
179. Smith DL, Petruzzello SJ, Kramer JM, Misner JE. The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*. 1997;40(4): 500–10.
180. Smith DL, Petruzzello SJ, Kramer JM, Warner SE, Bone BG, Misner JE. Selected physiological and psychobiological responses to physical activity in different configurations of firefighting gear. *Ergonomics*. 1995; 38(10): 2065–77.

- 
181. Smith DL, Petruzzello SJ. Selected physiological and psychological responses to live-fire drills in different configurations of firefighting gear. *Ergonomics*. 1998; 41(8): 1141–54.
  182. Song G, Paskaluk S, Sati R, Crown EM, Doug Dale J, Ackerman M. Thermal protective performance of protective clothing used for low radiant heat protection. *Text Res J*. 2011; 81(3): 311–23.
  183. Sothmann M, Saupe K, Raven P, Pawelczyk J, Davis P, Dotson C, Landy F, Siliunas M. Oxygen consumption during fire suppression: error of heart rate estimation. *Ergonomics*. 1991; 34: 1469-74.
  184. Tatterson AJ, HahnAG, Martin DT, FebbraioMA. Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists. *J Sci Med Sport*. 2000; 3: 186–93.
  185. Taylor NAS, Lewis MC, Notley SR, Peoples GE. A fractionation of the physiological burden of the personal protective equipment worn by firefighters. *Eur J Appl Physiol*. 2012; 112(8): 2913–21.
  186. Taylor NAS. Challenges to temperature regulation when working in hot environments. *Ind Health*. 2006; 44: 331–44.
  187. Tikuisis P, McLellan TM, Selkirk G. Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Med Sci Sports Exerc*. 2002; 34(9): 1454–61.
  188. von Heimburg ED, Rasmussen AKR, Medbø JI. Physiological responses of firefighters and performance predictors during a simulated rescue of hospital patients. *Ergonomics*. 2006; 49(2): 111–26.

189. Wang F, Gao C, Kuklane K, Holmér I. Effects various protective clothing and thermal environments on heat strain of unacclimated men: the PHS (predicted heat strain) model revisited. *Ind Health*. 2013; 51(3): 266–74.
190. Webster JK. The complete Australian bushfire book. Melbourne, Australia: Thomas Nelson; 1986.269 p.
191. Wegesser TC, Pinkerton KE, Last JA. California wildfires of 2008: coarse and fine particulate matter toxicity. *Environ Health Perspect*. 2009; 117: 893–97.
192. Wen S, Petersen S, McQueen R, Batcheller J. Modelling the physiological strain and physical burden of chemical protective coveralls. *Ergonomics*. 2015; 58(12): 2016–31.
193. Williams-Bell FM, Villar R, Sharratt MT, Hughson RL. Physiological demands of the firefighter Candidate Physical Ability Test. *Med Sci Sports Exerc*. 2009; 41(3): 653–62. doi: [0.1249/MSS.0b013e31818ad117](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818ad117).
194. Wu HC, Wang MJ. Relationship between maximum acceptable work time and physical workload. *Ergonomics*. 2002; 45: 280–89.
195. Yoo S, Barker RL. Comfort Properties of Heat-Resistant Protective Workwear in varying conditions of physical activity and environment. Part I: Thermophysical and sensorial properties of fabrics. *Textile Res. J*. 2005; 75(7): 523–30.
196. Young AJ, Sawka MN, Epstein Y, Decristofano B, Pandolf KB. Cooling different body surfaces during upper and lower body exercise. *J Appl Physiol*. 1987; 63: 1218–23.



## **9. ANEXO**





# Impact of Different Personal Protective Clothing on Wildland Firefighters' Physiological Strain

Belén Carballo-Leyenda<sup>1</sup>, José G. Villa<sup>1</sup>, Jorge López-Satué<sup>2</sup> and Jose A. Rodríguez-Marroyo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Physical Education and Sports, Institute of Biomedicine, University of León, León, Spain, <sup>2</sup> Empresa de Transformación Agraria, Madrid, Spain

## OPEN ACCESS

### Edited by:

Igor B. Mekjavic,  
Jožef Stefan Institute, Slovenia

### Reviewed by:

Matthew Cramer,  
Institute for Exercise and  
Environmental Medicine,  
United States  
Naoto Fujii,  
University of Tsukuba, Japan

### \*Correspondence:

Jose A. Rodríguez-Marroyo  
j.marroyo@unileon.es

### Specialty section:

This article was submitted to  
Exercise Physiology,  
a section of the journal  
Frontiers in Physiology

**Received:** 23 May 2017

**Accepted:** 09 August 2017

**Published:** 24 August 2017

### Citation:

Carballo-Leyenda B, Villa JG,  
López-Satué J and  
Rodríguez-Marroyo JA (2017) Impact  
of Different Personal Protective  
Clothing on Wildland Firefighters'  
Physiological Strain.  
Front. Physiol. 8:618.  
doi: 10.3389/fphys.2017.00618

Wildfire firefighting is an extremely demanding occupation performed under hot environment. The use of personal protective clothing (PPC) is needed to protect subjects from the thermal exposure. However, the additional use of PPC may increase the wildland firefighters' physiological strain, and consequently limit their performance. The aim of this study was to analyze the effect of four different PPC on the physiological strain of wildland firefighters under moderate conditions (30°C and 30% RH). Eight active and healthy wildland firefighters performed a submaximal walking test wearing a traditional short sports gear and 4 different PPC. The materials combination (viscose, Nomex, Kevlar, P-140 and fire resistant cotton) used during the PPC manufacturing process was different. During all tests, to simulate a real scenario subjects wore a backpack pump (20 kg). Heart rate, respiratory gas exchange, gastrointestinal temperature, blood lactate concentration, perceived exertion and temperature and humidity underneath the PPC were recorded throughout tests. Additionally, parameters of heat balance were estimated. Wearing a PPC did not cause a significant increase in the subjects' physiological response. The gastrointestinal temperature increment, the relative humidity of the microclimate underneath the PPC, the sweat residue in PPC, the sweat efficiency, the dry heat exchange and the total clothing insulation were significantly affected according to the PPC fabric composition. These results suggest that the PPC composition affect the moisture management. This might be taken into account to increase the wildland firefighters' protection in real situations, when they have to work close to the flames.

**Keywords:** heat stress, thermal strain, thermophysiological response, core temperature, protective clothing

## INTRODUCTION

Wildfire firefighting is an extremely demanding occupation (Ruby et al., 2002; Cuddy et al., 2015) that mainly takes place during the summer season. Activities performed during wildfire suppression require work with hand tools of different weight (3–20 kg) (Rodríguez-Marroyo et al., 2012) and they are usually performed under difficult conditions, such as inhaling smoke (Wegesser et al., 2009), working on steep terrain (Brotherhood et al., 1997) and in hot environments (Raimundo and Figueiredo, 2009; Rodríguez-Marroyo et al., 2012). Collectively, all these circumstances contribute to the high physiological strain observed during wildfires suppression (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

Performing demanding tasks in hot environments is associated with an increased heat stress (Gonzalez-Alonso et al., 1999; Chevront et al., 2010). The additional use of personal protective clothing (PPC) may increase the wildland firefighters' thermal strain (Bruce-Low et al., 2007), and consequently limit their performance (Selkirk and McLellan, 2004; Taylor et al., 2012). PPC affects the heat-dissipating thermoregulatory mechanisms since they limit the heat loss and vapor transfer between the skin and the environment (Holmér, 2006). Nonetheless, PPC protects subjects from a wide variety of work-related hazards mainly from the thermal exposure (Nayak et al., 2014). They are manufactured according to security standards (ISO, 2003), where technical requirements of the fabrics are specified. However, this certification does not take into account the process of making the suits, which does not allow to directly extrapolate the response that these fabrics will induce in thermoregulation once they constitute a complete suit and this is carried by a person. The design and materials combination during the PPC manufacturing process may affect their performance on the thermoregulatory response (Havenith and Heus, 2004). The degree of PPC's thermal and vapor insulation will depend on the clothing thickness, trapped air layers and fiber characteristics (e.g., weave, coatings and membranes) (Havenith, 2002).

It seems clear that PPCs have to provide a specific protection and minimize subjects' thermal and physiological strain in order to avoid injuries and not limit their performance. There is considerable research regarding the effect of different PPC on the thermoregulatory response of structural firefighters (Sköldström, 1987; Smith and Petruzzello, 1998; Selkirk and McLellan, 2004; Holmér et al., 2006; Bruce-Low et al., 2007), chemical (Wen et al., 2015), military (Montain et al., 1994) and industry (Poirier et al., 2015) situations. This contrasts with the paucity of studies carried out with wildland firefighters. To the best of our knowledge, an earlier study had analyzed wildland firefighters' response to different PPC (Budd et al., 1997). Budd et al. (1997) compared two different PPC, one thicker and more encapsulated vs. a lighter and more open one. However, these authors did not assess the physiological impact of the PPC on wildland firefighters vs. a control experimental condition (e.g., sports gear). Therefore, the aim of this study was to analyze the effect of four different PPC, according to their fabric composition, on the physiological strain of wildland firefighters during moderate exercise intensity (i.e., 250 W·m<sup>-2</sup>) and under warm environmental conditions (i.e., 30°C, 30% RH).

## METHODS

### Participants

Eight active and healthy male wildland firefighters (mean ± SD; age 30.8 ± 8.4 years, height 1.79 ± 0.06 m, body mass 76.9 ± 10.8 kg, maximal oxygen uptake 55.4 ± 9.1 ml·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>, and body surface area 1.9 ± 0.2 m<sup>2</sup>) were involved in this study. Subjects performed endurance exercise (45–60 min/training session) three times per week as part of their scheduled training. Written informed consent was obtained from the volunteers before starting the study. The study protocol was developed in

accordance with the guidelines of the Helsinki Conference for research on human subjects and was approved by the Ethics Committee of the University of León, Spain.

### Experimental Design

Each subject performed six trials over six separate testing sessions. Trials were separated by at least 48 h, during which participants were asked to refrain from strenuous exercise. The first trial was a maximal incremental test to determine subjects' characteristics and their exercise capacity (Bruce, 1971). During the second to sixth trial, subjects performed, in a balanced Latin Square design, a 120 min submaximal test wearing a traditional short sports gear (i.e., shorts, and cotton t-shirt, underwear and socks) and 4 different PPC. All PPC adhered to (ISO, 2003) and are currently used by Spanish wildland firefighters. Although wildland firefighters' personal protective equipment includes items such as helmet, gloves, goggles and mid-calf leather boots, they were not used during the trials. The same clothing (i.e., cotton t-shirt, underwear and socks) was worn under PPC during all trials. Garments' specifications are showed in **Table 1**. During all tests, to simulate a real scenario subjects wore a backpack pump (20 kg), which is routinely used during wildfire firefighting (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). In addition, the same running shoes (250–300 g per shoe) were used in every testing session.

### Tests Protocol

All tests were performed on a treadmill (h/p/cosmos pulsar, h/p/cosmos sports and medical GMBH, Nussdorf-Traunstein, Germany). Each test was preceded by a 10 min warm-up at 60% of maximum heart rate (8–10 km·h<sup>-1</sup>) and 5 min of stretching. The maximal test was performed according to the protocol described by Bruce (1971). The test started with a speed of 2.5 km·h<sup>-1</sup> and a slope of 10%. The speed and grade were incremented every 3 min until volitional exhaustion.

The submaximal tests were performed at the same time of the day (between 12:00 and 16:00 h) in a laboratory under climate-controlled conditions. Air temperature and relative humidity were maintained at 30°C and 30%, respectively, simulating those analyzed in real wildland fires (Rodríguez-Marroyo et al., 2012). The protocol consisted of 6 sets of walking at 6 km·h<sup>-1</sup> and a slope of 1% with 5 min passive rest periods in between. Each set duration was 15 min, except for the first set that was 20 min, so the total test length was 120 min. During recovery periods, 0.15 ml·kg<sup>-1</sup> of water every 1 min of exercise at 15°C (Selkirk and McLellan, 2004) was administered to prevent that subjects' dehydration limited the sweat rate (Chevront et al., 2010). The protocol used in this study was based on previous studies (Selkirk and McLellan, 2004) and the selected speed allowed subjects to perform an exercise intensity between 60 and 70% of the maximal heart rate, which simulates wildland firefighters' working conditions (Rodríguez-Marroyo et al., 2012).

### Measurements

ECG monitoring (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium) was performed throughout the maximal test to detect heart problems. During both maximal and submaximal tests, the heart rate (HR) response and the respiratory gas exchange

**TABLE 1** | Personal protective clothing (PPC) characteristics.

Layer		PPC#1	PPC#2	PPC#3	PPC#4
		Single	Reflective double layer on shoulders	Single	Single
Composition	FR viscose (%)	65	65	56	
	Nomex (%)	30	30	34	
	Kevlar (%)	5	5	8	
	P-140 (%)			2	
	FR cotton (%)				100
Mass (g)		1,460	1,560	1,440	1,000
Surface mass (g·m <sup>-2</sup> )		270	270	225	310
Total mass (kg)*		79.6 ± 7.4	79.5 ± 6.6	79.7 ± 7.0	78.1 ± 6.5
Fabric thermal resistance (m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )		0.0192	0.0192	0.0213	0.0260
Fabric evaporative resistance (m <sup>2</sup> ·Pa·W <sup>-1</sup> )		3.79	3.79	3.45	3.51

FR, fire resistant. \*Subjects mass while wearing the PPC.

was continuously measured every 5-s (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) and breath-by-breath (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium), respectively.  $\text{VO}_{2\text{max}}$  was accepted as the highest 30-s moving average.

Gastrointestinal temperature was recorded throughout submaximal trials using a Jonah intestinal temperature capsule (VitalSense, Phillips Respironics, Bend, OR, USA) which was ingested at least 8 h before the beginning of trials (Wen et al., 2015). Temperature and humidity underneath the PPC were also measured (Termoregister TR-72U, T and D, Japan). Data logger was placed at the sternum level, between the cotton t-shirt and PPC. Temperature and humidity data, as well as HR and  $\text{VO}_2$  data from the last 5 min of each submaximal exercise stage, were considered representative measurements of each stage. The gastrointestinal temperature and HR data were used to calculate the physiological strain index (PSI) throughout the trials according to Tikuisis et al. (2002).

Capillary blood samples were taken from a previously hyperemized earlobe to measure blood lactate concentration (Lactate Scout, Senslab, Leipzig, Germany) after the end of each submaximal stage. During the last 30-s of each exercise stage, the Rating of Perceived Exertion (RPE) was recorded using the Borg scale (6–20) (Borg, 1982). The scale was explained and administered by the same researcher, asking about subjects' perceived exertion using the same question. A cue card was located in front of subjects to allow immediate reference to the scale. Additionally, subjects' moisture sensation was recorded at the end of each trial, using a categorical scale (1–9) (Havenith and Heus, 2004). Verbal anchors associated with 1 and 9 were identified with *slightly moist* and *totally soaked*, respectively.

Subjects, in underwear, and each clothing component were separately weighted (50K150, COBOS, Hospitalet de Llobregat, Barcelona, Spain) at the beginning and the end of each submaximal trial. This allows calculating the total sweat production, sweat residue and sweat evaporation (Havenith and Heus, 2004; Kofler et al., 2015). Total sweat was corrected for the fluid intake. Water loss through breathing was neglected and was assumed to be similar between trials (Saunders et al., 2005).

Finally, the sweat efficiency was calculated as the ratio between sweat evaporation and total sweat (Havenith and Heus, 2004).

Heat balance of the body was estimated using a method of partitional calorimetry summarized in equation 1 (Bröde et al., 2008):

$$S = M - W \pm \text{DRY} - E_{\text{sk}} - \text{RES} \quad (1)$$

Components of the equation were heat storage (S), metabolic energy production (M), effective mechanical work (W), heat loss through evaporative and convective heat exchange via respiration ( $\text{RES} = E_{\text{res}} + C_{\text{res}}$ ), evaporative heat loss ( $E_{\text{sk}}$ ), and dry heat loss ( $\text{DRY} = C + R + K$ ). All heat balance parameters were calculated in  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . The components were estimated and served only to substantiate the results.

The rate of metabolic heat production was calculated from measured respiratory quotient (RQ) and  $\text{VO}_2$  ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) and the body surface area ( $A_{\text{D}}$ ;  $\text{m}^2$ ) calculated using DuBois formula (DuBois and DuBois, 1916), as shown below in Equation (2) (Gagge and Gonzalez, 1996):

$$M = [0.23(\text{RQ}) + 0.77] \times 5.873 \times \text{VO}_2 \times (60/A_{\text{D}}) \quad (2)$$

Effective mechanical work was calculated using acceleration due to gravity ( $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ), the dressed mass of participants ( $m_{\text{d}}$ ; kg), the speed ( $v$ ;  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the grade fraction (F) of the treadmill and  $A_{\text{D}}$ , using Equation (3) (McLellan et al., 1996):

$$W = 9.8 \times m_{\text{d}} \times v \times F \times A_{\text{D}}^{-1} \quad (3)$$

The respiratory heat loss components  $C_{\text{res}}$  and  $E_{\text{res}}$  were calculated using Equations (4) and (5), respectively (Bröde et al., 2008):

$$C_{\text{res}} = 1.516 \times 10^{-3} \times M \times (28.56 - 0.641 \times P_{\text{a}} - 0.885 \times T_{\text{a}}) \quad (4)$$

$$E_{\text{res}} = 1.27 \times 10^{-3} \times M \times (59.34 - 11.63 \times P_{\text{a}} + 0.53 \times T_{\text{a}}) \quad (5)$$

where  $P_a$  is the atmospheric pressure in Pascals,  $T_a$  is the ambient temperature in  $^{\circ}\text{C}$  and  $M$  is the rate of metabolic heat production in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , calculated with Equation (3).

$S$  was calculated as  $(\Delta T_b \times \Delta t^{-1}) \times \text{BM} \times A_D^{-1} \times c_p$ .  $\Delta T_b \times \Delta t^{-1}$  in  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  was described as the rate of change of body temperature accounting for tests duration (s),  $c_p$  represented the specific heat of body tissue (3,480 J) and BM, body mass in kg. As skin temperature ( $T_{\text{skin}}$ ) was not measured, the chest temperature ( $T_{\text{chest}}$ ) of the microclimate underneath PPC served as an indirect marker of  $T_{\text{skin}}$  (Kofler et al., 2015). Mean body temperature ( $T_b$ ) in  $^{\circ}\text{C}$  was estimated by 4:1 ratio of gastrointestinal temperature ( $T_{\text{GI}}$ ) and  $T_{\text{chest}}$  as  $T_b = 0.8 \times T_{\text{GI}} + 0.2 \times T_{\text{chest}}$ , recommended for warm environments (Bröde et al., 2008).

$E_{\text{sk}}$  corrected for respiratory loss was estimated as  $\lambda \times (m_e \times \Delta t^{-1}) \times A_D^{-1} - E_{\text{res}}$ . Where  $m_e$  is the evaporative sweat loss (g) with  $\Delta t$  denoting measurement time (s),  $\lambda$  the enthalpy of evaporation (2,430  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) and  $E_{\text{res}}$  is the respiratory heat evaporation calculated using Equation (5). DRY resulted by solving the heat balance equation with the other known components using Equation (6) (Bröde et al., 2008):

$$\text{DRY} = M - W - E_{\text{sk}} - \text{RES} - S \quad (6)$$

Additionally, total insulation ( $I_t$ ) of clothing was estimated through the equation  $(T_{\text{chest}} - T_a) \times \text{DRY}^{-1}$ . This estimation was also less precise, like the calculation of  $S$  because of using  $T_{\text{chest}}$  instead of  $T_{\text{skin}}$  (Kofler et al., 2015).

## Statistical Analysis

The results are expressed as mean  $\pm$  standard deviation ( $SD$ ). The assumption of normality was verified using the Shapiro-Wilk's test. The variables analyzed throughout the submaximal trials ( $\text{VO}_2$ , ventilation, HR, blood lactate concentration, gastrointestinal temperature, PSI, micro environment temperature, relative humidity, and RPE) were compared using a repeated two-way ANOVA with two within-subject factors (clothing and time). A one-way ANOVA with repeated measures was applied to calculate differences between trials when subjects' gastrointestinal temperature increment, moisture sensation, and the different parameters of heat balance and sweat were studied. When a significant  $F$ -value was found, Bonferroni's test was used to establish significant differences between means. The assumption of sphericity was checked using the Mauchly's test when this assumption was violated the Greenhouse-Geisser adjustment was performed. Values of  $p < 0.05$  were considered statistically significant. SPSS V.19.0 statistical software (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) was used.

## RESULTS

The interaction between clothing condition and time was not significant for  $\text{VO}_2$ , ventilation, HR, blood lactate, gastrointestinal temperature, PSI, temperature underneath the PPC, and RPE (Figure 1). The mean values analyzed during the trials were:  $1.5 \pm 0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $48.4 \pm 8.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $114 \pm 15 \text{ bpm}$ ,  $1.5 \pm 0.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $37.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $3.2 \pm 0.7$  units,  $32.7 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$  and  $10.7 \pm 2.0$ , respectively. Likewise during the trials no

significant main effect of time condition was present on these variables (Figure 1). However, the gastrointestinal temperature increment was significantly higher with PPC#3 ( $0.7 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ) than those analyzed with the others PPC ( $0.2 \pm 0.3$ ,  $0.2 \pm 0.5$  and  $0.2 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  for PPC#1, PPC#2, PPC#4, respectively) and sports gear ( $0.3 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ).

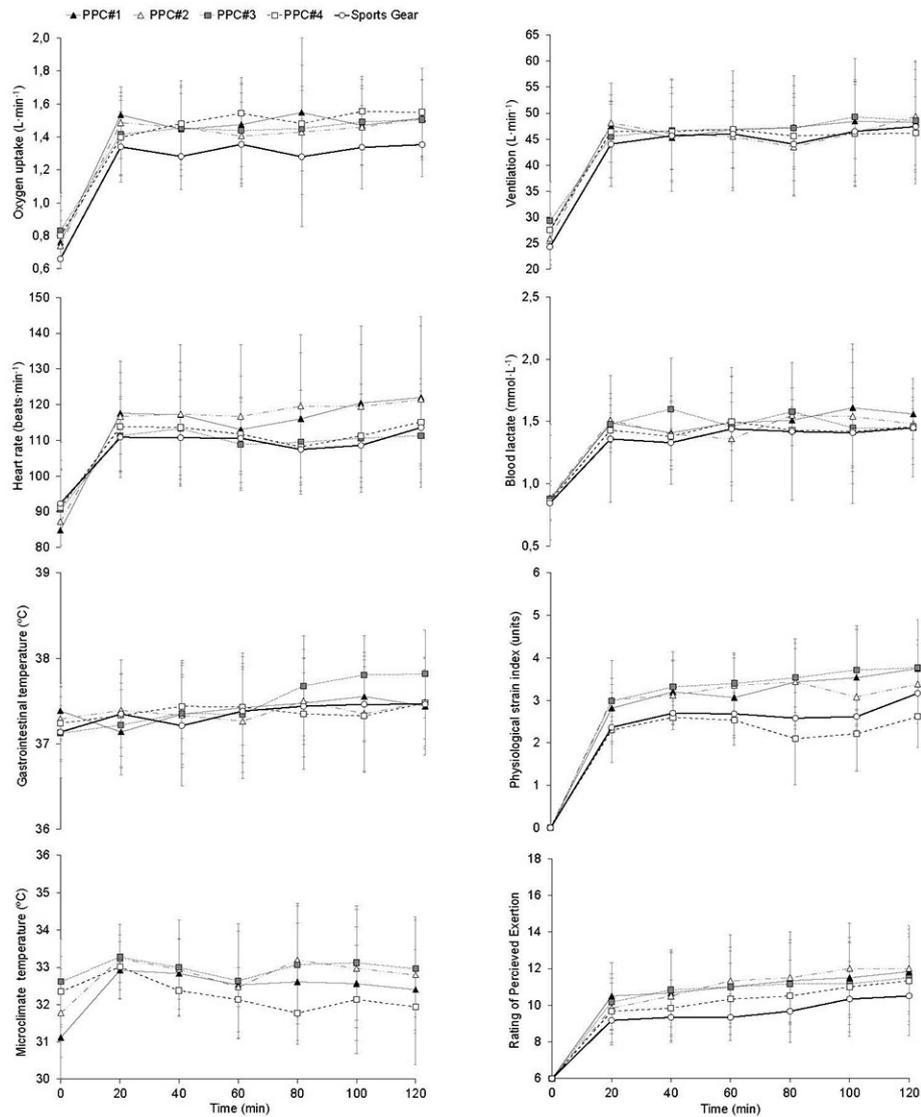
The relative humidity of the microclimate underneath the PPC was higher ( $p < 0.05$ ) in PPC#2, PPC#3 than PPC#4 ( $81.2 \pm 4.7$  and  $77.7 \pm 5.0$  vs.  $71.7 \pm 4.9\%$ ). From the 60th minute of trail, the lowest ( $p < 0.05$ ) values were analyzed in PPC#4 (Figure 2). The humidity data increased more rapidly during the first part of the trials (i.e., 0–60 min), and it slowed during the second hour (i.e., 60–120 min) (Figure 2). Collectively, significant differences ( $p < 0.05$ ) between the data analyzed at 5–20 min ( $\sim 63\%$  RH) vs. 60–120 min ( $\sim 84\%$  RH) were found.

The total sweat production was similar in all PCC and when subject wore the sports gear (Table 2). The sweat residue in underwear was similar in all tests. However, the sweat residue in PPC#1 was the lowest ( $p < 0.05$ ), and as a consequence the sweat efficiency of PPC#1 was the highest ( $p < 0.05$ ) of all PCC analyzed in this study. Indeed, the lower ( $p < 0.05$ ) subjects' moisture sensation was analyzed with the PPC#1 ( $5.6 \pm 0.3$ ,  $7.6 \pm 0.9$ ,  $7.0 \pm 0.6$ , and  $8.2 \pm 0.5$  for PPC#1, PPC#2, PPC#3, and PPC#4, respectively). The lowest value was obtained when subjects wore the sports gear ( $3.8 \pm 1.0$ ).

Estimated parameters of heat balance are showed in Table 3. The dry heat exchange of PPC#2 and PPC#3 was significantly ( $p < 0.05$ ) different from PPC#4. Total clothing insulation was significantly ( $p < 0.05$ ) lower in PPC#1.

## DISCUSSION

The aim of this study was to investigate the effect of different PPC on the physiological strain of wildland firefighters. Contrary to our expectations, no significant differences in the cardiorespiratory variables analyzed between the ensembles were found (Figure 1). Previous studies (Baker et al., 2000; Dorman and Havenith, 2009; Wen et al., 2015) reported an increase of 10–20% in the physiological response (e.g.,  $\text{VO}_2$ ) with the use of different PPC. Other studies (Sköldström, 1987; Taylor et al., 2012; Lee et al., 2014) analyzed a greater increase ( $>20\%$ ) in structure firefighters when they used the self-contained breathing apparatus, due to the rise in weight (10–20 kg) of the ensemble (Lee et al., 2014). The mean increase observed in this study when wearing the PPC was lower,  $\sim 12\%$ . Possibly, this was consequence of the lower thermal insulation of the PPC used by wildland firefighters ( $\sim 0.23 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) (Raimundo and Figueiredo, 2009) vs. those of structure firefighters ( $0.47 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) (Holmér et al., 2006), which have allowed for a greater heat dissipation. Additionally, in this study subjects performed the trials without gloves, helmet and boots. This conditioned their thermoregulatory response by increasing the body surface exposed to the environment and thus facilitate the heat loss (Holmér, 2006; Lee et al., 2014). Lee et al. (2014) did not find significant differences in the  $\text{VO}_2$  and HR of structure firefighters when they wore the



**FIGURE 1** | Comparative responses of oxygen uptake, ventilation, heart rate, blood lactate concentration, gastrointestinal temperature, physiological strain index, temperature of the microclimate underneath the personal protective clothing (PPC), and rating of perceived exertion during the different trials.

protective equipment without gloves, helmet and boots vs. a sports gear.

The limited weight difference between the ensembles studied might have influenced in the physiological variables pattern. It has been reported that more than half of the increase in the metabolic rate is due to the PPC weight (Dorman and Havenith, 2009). Indeed, no differences in the cardiorespiratory response or RPE have been found when wearing a light-weight workwear compared to a control condition (Kofler et al., 2015). On the other hand, the subjects' aerobic fitness might attenuate the HR,  $VO_2$ , gastrointestinal temperature and RPE response in the trials where the PPC were worn (Selkirk and McLellan, 2001). The  $VO_{2max}$  analyzed in this study was  $\sim 28\%$  higher than that previously described ( $\sim 43 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in wildland

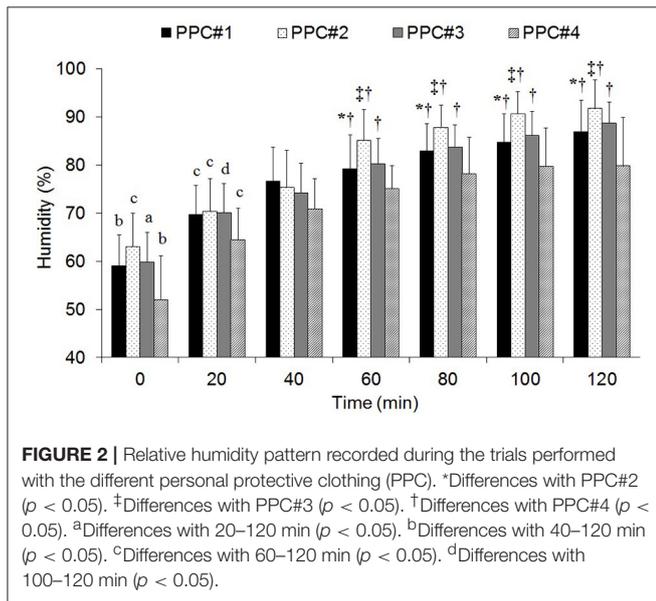
firefighters (Phillips et al., 2011). Subjects with greater fitness present higher tolerance to effort under conditions of thermal stress wearing a PPC (Selkirk and McLellan, 2001).

Wearing a PPC in hot environments has been associated with an increased body temperature (Smith and Petruzzello, 1998; Bruce-Low et al., 2007). However, in moderate environmental conditions, such as those maintained in this study, no significant differences in gastrointestinal temperature were observed (Figure 1), despite the greater temperature elevation analyzed throughout the trial in PPC#3. Collectively, this findings are in agreement with those obtained in previous research performed under similar conditions with light-weight PPC (Wang et al., 2013; Kofler et al., 2015). Subjects' gastrointestinal temperature was below  $38^\circ\text{C}$  during all trials. This value has been

informed as a limiting factor of performance during exercise in heat (Gonzalez-Alonso et al., 1999). Possibly, the temperature remained stable during the trials performed with PPC by the increase of the cardiovascular stress. In fact, the mean HR was ~5% higher ( $p > 0.05$ ) when subjects wore the PPC. It may be speculated that this was due to the increase of the cutaneous circulation in order to favor the heat dissipation (Cheuvront et al., 2010). The HR pattern might also be reflecting the greater metabolic rate related to the weight difference between PPC and

the sports gear configuration (Dorman and Havenith, 2009). The  $VO_2$  was higher ( $p > 0.05$ ) by  $\sim 200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  with vs. without PPC (Figure 1).

Globally, we analyzed a difference of  $\sim 2.5^\circ\text{C}$  between the temperature of the microclimate underneath the PPC and the outside temperature. However, the mean temperature of the microclimate of PPC#2 and PPC#3 was  $0.8^\circ\text{C}$  higher ( $p > 0.05$ ) than those analyzed in the other PPC. This difference accentuated more after the first 60 min of exercise (Figure 1). This fact might be related with the lower dry heat exchange observed in PPC#2 and PPC#3 (Table 3) due to the thickness and air porosity of these garments (Havenith et al., 2011). The studied PPC are manufactured with highly heat-resistant fabrics (i.e., Nomex and Kevlar) mixed with fire resistant viscose, which lends PPC a greater air permeability and comfort (Yoo and Barker, 2005). The PPC#3 composition had a 10% less of viscose (Table 1), so its porosity and air permeability was reduced, which might negatively affect the dry heat exchange. The PPC#2 had a double layer in the shoulders area which increases its thickness and thermal insulation, thus limiting the dry heat exchange (Holmér, 2006). The reduced dry heat exchange and evaporative heat loss obtained in PPC#3 would explain the higher increase in gastrointestinal temperature observed in this garment ( $0.7^\circ\text{C}$ ) compared to the other ensembles ( $\sim 0.3^\circ\text{C}$ ). No significant differences were found in evaporative heat transfer between PPC (Table 3). Probably this was related to the variability of the evaporated sweat calculation. However, the higher relative humidity observed underneath PPC#2 and PPC#3 and the lower magnitude of evaporative heat loss, suggests that the evaporative heat transfer might be decreased in both garments. Several studies have related the higher humidity in



**TABLE 2 |** Sweat measurements analyzed in this study (mean  $\pm$  SD).

	PPC#1	PPC#2	PPC#3	PPC#4	Sports gear
Total sweat production (g)	1,910 $\pm$ 360	2,342 $\pm$ 450	2,110 $\pm$ 390	1,968 $\pm$ 370	1,925 $\pm$ 447
Sweat residue in underwear (g)	367 $\pm$ 53	368 $\pm$ 70	361 $\pm$ 54	409 $\pm$ 61	335 $\pm$ 156
Sweat residue in garment (g)	178 $\pm$ 51*†‡	579 $\pm$ 278	545 $\pm$ 156	418 $\pm$ 124	
Sweat evaporation (g)	1,514 $\pm$ 327	1,395 $\pm$ 161	1,274 $\pm$ 268	1,189 $\pm$ 338 <sup>§</sup>	1,609 $\pm$ 251
Sweat efficiency (%)	74 $\pm$ 5*†‡ <sup>§</sup>	61 $\pm$ 7 <sup>§</sup>	59 $\pm$ 5 <sup>§</sup>	58 $\pm$ 9	84 $\pm$ 8

PPC, personal protective clothing. \*Differences with PPC#2 ( $p < 0.05$ ). †Differences with PPC#3 ( $p < 0.05$ ). ‡Differences with PPC#4 ( $p < 0.05$ ). §Differences with Sports Gear ( $p < 0.05$ ).

**TABLE 3 |** Estimated parameters of heat balance analysis (mean  $\pm$  SD).

	PPC#1	PPC#2	PPC#3	PPC#4
Heat storage ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	4.5 $\pm$ 7.5	5.5 $\pm$ 14.0	8.1 $\pm$ 6.3	3.8 $\pm$ 6.0
Metabolic heat production ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	250.5 $\pm$ 23.7	238.4 $\pm$ 26.1	243.2 $\pm$ 34.9	248.1 $\pm$ 22.4
Respiratory heat exchange ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	10.2 $\pm$ 1.0	9.7 $\pm$ 1.0	9.9 $\pm$ 0.9	10.1 $\pm$ 0.9
Evaporative heat loss from skin ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	251.5 $\pm$ 48.1	232.9 $\pm$ 30.5	210.9 $\pm$ 42.9	197.4 $\pm$ 57.7
Dry heat exchange ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	15.8 $\pm$ 15.7	9.9 $\pm$ 12.4†	11.4 $\pm$ 6.7†	30.4 $\pm$ 24.1
Total clothing insulation ( $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ )	0.08 $\pm$ 0.06*†‡	0.35 $\pm$ 0.38	0.31 $\pm$ 0.22	0.26 $\pm$ 0.36

PPC, personal protective clothing. \*Differences with PPC#2 ( $p < 0.05$ ). †Differences with PPC#3 ( $p < 0.05$ ). ‡Differences with PPC#4 ( $p < 0.05$ ).

the microclimate with the lesser effective sweat evaporation (Kwon et al., 1998; Yoo and Barker, 2005; Bröde et al., 2008).

Although the lower relative humidity was analyzed in PPC#4 (Figure 2), this did not lead to increased sweat evaporation. Indeed, the lower value was found in PPC#4 (Table 2), obtaining a sweat efficiency similar to that of PPC#2 and PPC#3 (~60%). The PPC#4 composition (100% cotton) and its greater thickness might have conditioned this pattern (Yoo and Barker, 2005). It has been reported the high capacity of cotton to retain moisture and its low evaporative efficiency when sweating is abundant (Kwon et al., 1998). These results confirm previous findings (Holmér, 1985), which highlight the high capacity of synthetic fibers (e.g., polyester, nylon, aramid) to transfer moisture quickly to the outside.

A higher sweat residue in the PPC might be beneficial to reduce the subjects' thermal strain since it would increase its thermal conductivity (Chen et al., 2003; Keiser and Rossi, 2008). In addition, the body movement when walking generates air currents that improve the heat exchange by increasing the ventilation (Qian and Fan, 2009). This forced convection due to movement might have helped the sweat evaporation throughout the trials (Lotens and Havenith, 1995; Bröde et al., 2008). This would avoid an excessive increase in the subjects' thermophysiological response at the end of the trials (Figure 1). However, a high sweat residue in PPC might be a disadvantage during wildfires suppressions. In these situations wildland firefighters are exposed to both radiant and convective heat (Raimundo and Figueiredo, 2009), with heat flows that oscillate between 0.42 and 8.37 kW·m<sup>-2</sup> (Mäkinen, 2005). Under this circumstance the heat transfer would be reversed, passing the body to gain heat instead of dissipating it (Holmér, 2006).

Therefore, a high amount of moisture retained in the PPC might increase the risk of scalds (Keiser and Rossi, 2008). Taking into account the above, the PPC#1 would be the most advantageous garment to protect the wildland firefighters in real scenarios, since it retained ~65% less moisture content (Table 2). With this PPC subjects obtained the highest comfort (i.e., the lowest moisture sensation), which might affect the wildland firefighters' work efficiency and performance (Nayak et al., 2014).

In summary, no significant differences in the cardiorespiratory variables, blood lactate, gastrointestinal temperature, PSI and RPE between the different PPCs were found. However, our results suggest that the PPC composition affected the sweat efficiency and moisture sensation. The highest sweat efficiency and comfort were analyzed when subjects wore the PPC#1. In addition, the lowest moisture content was found in this garment. This might mean more protection for wildland firefighters in real situations, when they have to work close to the flames.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Study Design: BC, JL, JV, JR. Data collection: BC, JL, JV. Data analyses: BC, JL, JV. Interpretation of the results: BC, JL, JV, JR. Manuscript writing: BC, JR. Approved the final manuscript version: BC, JL, JV, JR.

## FUNDING

Financial support from Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Spain) grant (DEP2016-79762-P). In addition, the study has been funded by Empresa de Transformación Agraria, S.A. (TRAGSA).

## REFERENCES

- Baker, S. J., Grice, J., Roby, L., and Matthews, C. (2000). Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics* 43, 1350–1358. doi: 10.1080/001401300421798
- Borg, G. A. V. (1982). Psychological bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14, 48–58.
- Bröde, P., Havenith, G., Wang, X., Candas, V., den Hartog, E. A., Griefahn, B., et al. (2008). Non-evaporative effects of a wet mid layer on heat transfer through protective clothing. *Eur. J. Appl. Physiol.* 104, 341–349. doi: 10.1007/s00421-007-0629-y
- Brotherhood, J. R., Budd, G. M., Hendrie, A. L., Jeffrey, S. E., Beasley, F. A., Costin, B. P., et al. (1997). Project Aquarius 3. effects of work rate on the productivity, energy expenditure, and physiological responses of men building fireline with a rakehoe in dry eucalypt forest. *Int. J. Wildl. Fire* 7, 87–98. doi: 10.1071/WF9970087
- Bruce, R. A. (1971). Exercise testing of patients with coronary artery disease. *Ann. Clin. Res.* 3, 323–332.
- Bruce-Low, S. S., Cotterrell, D., and Jones, G. E. (2007). Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises. *Ergonomics* 50, 80–98. doi: 10.1080/00140130600980912
- Budd, G. M., Brotherhood, J. R., Hendrie, A. L., Jeffrey, S. E., Beasley, F. A., Costin, B. P., et al. (1997). Project Aquarius 13. the thermal burden of high insulation and encapsulation in wildland firefighters clothing. *Int. J. Wildl. Fire* 7, 207–218. doi: 10.1071/WF9970207
- Chen, Y. S., Fan, J., and Zhang, W. (2003). Clothing thermal insulation during sweating. *Text Res. J.* 73, 152–157. doi: 10.1177/004051750307300210
- Cheuvront, S. N., Kenefick, R. W., Montain, S. J., and Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J. Appl. Physiol.* 109, 1989–1995. doi: 10.1152/jappphysiol.00367.2010
- Cuddy, J. S., Sol, J. A., Hailes, W. S., and Ruby, B. C. (2015). Work patterns dictate energy demands and thermal strain during wildland firefighting. *Wilderness Environ. Med.* 26, 221–226. doi: 10.1016/j.wem.2014.12.010
- Dorman, L. E., and Havenith, G. (2009). The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *Eur. J. Appl. Physiol.* 105, 463–470. doi: 10.1007/s00421-008-0924-2
- DuBois, D., and DuBois, E. F. (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch. Intern. Med.* 17, 863–871.
- Gagge, A. P., and Gonzalez, R. R. (1996). "Mechanisms of heat exchange: biophysics and physiology," in *Handbook of Physiology, Environmental Physiology*, eds M. J. Fregly and C. M. Blatteis (Bethesda, MD: American Physiological Society), 46–84.
- Gonzalez-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S. L., Jensen, F. B., Hyldig, T., and Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 86, 1032–1039.
- Havenith, G. (2002). Interaction of clothing and thermoregulation. *Exog. Dermatol.* 1, 221–230. doi: 10.1159/000068802

- Havenith, G., den Hartog, E., and Martin, S. (2011). Heat stress in chemical protective clothing: porosity and vapour resistance. *Ergonomics* 54, 497–507. doi: 10.1080/00140139.2011.558638
- Havenith, G., and Heus, R. (2004). A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Appl. Ergon.* 35, 3–20. doi: 10.1016/j.apergo.2003.11.001
- Holmér, I. (1985). Heat exchange and thermal insulation compared in woolen and nylon garments during wear trials. *Text Res. J.* 55, 511–518. doi: 10.1177/004051758505500901
- Holmér, I. (2006). Protective clothing in hot environments. *Ind. Health* 44, 404–413. doi: 10.2486/indhealth.44.404
- Holmér, I., Kuklane, K., and Gao, C. (2006). Test of firefighter's turnout gear in hot and humid air exposure. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 12, 297–305. doi: 10.1080/10803548.2006.11076689
- International Standardization Organization (ISO) (2003). *Protective Clothing for Firefighters. Laboratory Test Methods and Performance Requirements for Wildland Firefighting Clothing*. ISO 15384. Geneva: ISO.
- Keiser, C., and Rossi, R. (2008). Temperature analysis for the prediction of steam formation and transfer in multilayer thermal protective clothing at low level thermal radiation. *Text Res. J.* 78, 1025–1035. doi: 10.1177/0040517508090484
- Kofler, P., Burtscher, M., Heinrich, D., Bottoni, G., Caven, B., Bechtold, T., et al. (2015). Performance limitation and the role of core temperature when wearing light-weight workwear under moderate thermal conditions. *J. Therm. Biol.* 47, 83–90. doi: 10.1016/j.jtherbio.2014.11.007
- Kwon, A., Kato, M., Kawamura, H., Yanai, Y., and Tokura, H. (1998). Physiological significance of hydrophilic and hydrophobic textile materials during intermittent exercise in humans under the influence of warm ambient temperature with and without wind. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78, 487–493. doi: 10.1007/s004210050450
- Lee, J.-Y., Kim, S., Jang, Y.-J., Baek, Y.-J., and Park, J. (2014). Component contribution of personal protective equipment to the alleviation of physiological strain in firefighters during work and recovery. *Ergonomics* 57, 1068–1077. doi: 10.1080/00140139.2014.907449
- Lotens, W. A., and Havenith, G. (1995). Effects of moisture absorption in clothing on the human heat balance. *Ergonomics* 38, 1092–1113. doi: 10.1080/00140139508925176
- Mäkinen, H. (2005). "Firefighter's protective clothing," in *Textiles for Protection*, ed R. A. Scott (Cambridge, Woodhead), 622–647.
- McLellan, T. M., Pope, J. I., Cain, J. B., and Cheung, S. S. (1996). Effects of metabolic rate and ambient vapour pressure on heat strain in protective clothing. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 74, 518–527.
- Montain, S. J., Sawka, M. N., Cadarette, B. S., Quigley, M. D., and McKay, J. M. (1994). Physiological tolerance to uncompensable heat stress: effects of exercise intensity, protective clothing, and climate. *J. Appl. Physiol.* 77, 216–222.
- Nayak, R., Houshyar, S., and Padhye, R. (2014). Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing. *Fire Sci. Rev.* 3, 4. doi: 10.1186/s40038-014-0004-0
- Phillips, M., Petersen, A., Abbiss, C. R., Netto, K., Payne, W., Nichols, D., et al. (2011). Pack Hike Test finishing time for Australian firefighters: pass rates and correlates of performance. *Appl. Ergon.* 42, 411–418. doi: 10.1016/j.apergo.2010.08.020
- Poirier, M. P., Meade, R. D., McGinn, R., Friesen, B. J., Hardcastle, S. G., and Flouris, A. D., et al. (2015). The influence of Arc-flash and fire-resistant clothing on thermoregulation during exercise in the heat. *J. Occup. Environ. Hyg.* 12, 654–667. doi: 10.1080/15459624.2015.1029615
- Qian, X., and Fan, J. (2009). A quasi-physical model for predicting the thermal insulation and moisture vapour resistance of clothing. *Appl. Ergon.* 40, 577–590. doi: 10.1016/j.apergo.2008.04.022
- Raimundo, A. M., and Figueiredo, A. R. (2009). Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Saf. J.* 44, 514–521. doi: 10.1016/j.firesaf.2008.10.007
- Rodríguez-Marroyo, J. A., López-Satué, J., Pernía, R., Carballo, B., García-López, J., Foster, C., et al. (2012). Physiological work demands of Spanish wildland firefighters during wildfire suppression. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 85, 221–228. doi: 10.1007/s00420-011-0661-4
- Ruby, B. C., Shriver, T. C., Zderic, T. W., Sharkey, B. J., Burks, C., and Tysk, S. (2002). Total energy expenditure during arduous wildfire suppression. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1048–1054. doi: 10.1097/00005768-200206000-00023
- Saunders, A. G., Dugas, J. P., Tucker, R., Lambert, M. I., and Noakes, T. D. (2005). The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol. Scand.* 183, 241–255. doi: 10.1111/j.1365-201X.2004.01400.x
- Selkirk, G. A., and McLellan, T. M. (2001). Influence of aerobic fitness and body fatness on tolerance to uncompensable heat stress. *J. Appl. Physiol.* 91, 2055–2063.
- Selkirk, G. A., and McLellan, T. M. (2004). Physical Work Limits for Toronto firefighters in warm environments. *J. Occup. Environ. Hyg.* 1, 199–212. doi: 10.1080/15459620490432114
- Sköldström, B. (1987). Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics* 30, 1589–1597. doi: 10.1080/00140138708966049
- Smith, D. L., and Petruzzello, S. J. (1998). Selected physiological and psychological responses to live-fire drills in different configurations of firefighting gear. *Ergonomics* 41, 1141–1154. doi: 10.1080/001401398186441
- Taylor, N. A. S., Lewis, M. C., Notley, S. R., and Peoples, G. E. (2012). A fractionation of the physiological burden of the personal protective equipment worn by firefighters. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112, 2913–2921. doi: 10.1007/s00421-011-2267-7
- Tikusis, P., McLellan, T. M., and Selkirk, G. (2002). Perceptual vs. physiological heat strain during exercise-heat stress. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1454–1461. doi: 10.1097/00005768-200209000-00009
- Wang, F., Gao, C., Kuklane, K., and Holmér, I. (2013). Effects of various protective clothing and thermal environments on heat strain of unacclimated men: the PHS (predicted heat strain) model revisited. *Ind. Health* 51, 266–274. doi: 10.2486/indhealth.2012-0073
- Wegesser, T. C., Pinkerton, K. E., and Last, J. A. (2009). California wildfires of 2008: coarse and fine particulate matter toxicity. *Environ. Health Perspect.* 117, 893–897. doi: 10.1289/ehp.0800166
- Wen, S., Petersen, S., McQueen, R., and Batcheller, J. (2015). Modelling the physiological strain and physical burden of chemical protective coveralls. *Ergonomics* 58, 2016–2031. doi: 10.1080/00140139.2015.1051595
- Yoo, S., and Barker, R. L. (2005). Comfort properties of heat resistant protective workwear in varying conditions of physical activity and environment. part II: perceived comfort response to garments and its relationship to fabric properties. *Text. Res. J.* 75, 531–539. doi: 10.1177/0040517505054190

**Conflict of Interest Statement:** The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2017 Carballo-Leyenda, Villa, López-Satué and Rodríguez-Marroyo. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.