

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**



**“DETECCIÓN DE FATIGA MENTAL EN TAREAS ATENCIONALES
A TRAVÉS DE CAMBIO DE LA TEMPERATURA CORPORAL PERIFÉRICA”**

NORMAN RODRIGO RICARDO AGURTO RIVERA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN NEUROCIENCIAS

DIRECTORES DE TESIS: Prof. Dr. PEDRO MALDONADO ARBOGAST

Prof. Dr. RODRIGO VERGARA ORTUZAR

2019

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**

INFORME DE APROBACION TESIS DE MAGISTER

**Se informa a la Comisión de Grados Académicos de la Facultad de Medicina,
que la Tesis de Magister presentada por la(el) candidata(o)**

Norman Rodrigo Ricardo Agurto Rivera

**ha sido aprobada por la Comisión Informante de Tesis como requisito para
optar al Grado de Magister en Neurociencias en el Examen de Defensa de
Tesis rendido el día 26 de Abril de 2019.**

**Prof. Dr.(a) Pedro Maldonado A.
Director de Tesis**

**Prof. Dr.(a) Rodrigo Vergara O.
Director de Tesis**

COMISION INFORMANTE DE TESIS

Prof. Dr. Juan Velázquez S.

Prof. Dr. Jorge Mpodozis M.

**Prof. Dr. José Luis Valdés Guerrero
Presidente Comisión**

Dedicatoria

Dedico este trabajo de manera muy especial

a quienes son mis pilares y refugio.

A mi amada Daniela y mi pequeño Santi.

Agradecimientos

Agradezco el apoyo y orientación de un hermoso grupo humano, como es el Laboratorio de Neurosistemas que dirige Pedro, que con tanta calidez me brindaron su acogida en un terreno inexplorado para mí. No deja de asombrarme la generosidad con que compartieron sus conocimientos. Acá se respira espíritu colaborativo. Gracias Rodrigo por tu infinita paciencia, al final dejé de llorar. Gracias a Samuel por aportar la magia (sí, eres el “wizard”). Gracias a Enrique, Roberto, Christ y tantos otros. Y muchas gracias a Pedro, el director de orquesta, espero que esto no acabe acá.

Muchas gracias a mi familia por la comprensión, el amor y la confianza, ahora que “he vuelto a la vida” prometo retomar las juntas y los asados, así que prepárate Ricardo. Gracias a mis mujeres, Dani, Rosita y mi querida madre, a quienes tanto admiro, son mi inspiración. Finalmente, gracias a mi pequeño Santi, por las sonrisas y los juegos. Espero que cuando grande leas esto y veas que si el papá pudo tú también puedes.

“Es imposible escapar a la impresión de que las personas comúnmente usan estándares falsos de medición: buscan el poder, el éxito y la riqueza para sí mismos y los admiran en los demás, y subestiman lo que es de verdadero valor en la vida”.

Sigmund Freud.

ÍNDICE

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
<i>¿Qué es la fatiga mental?.....</i>	<i>13</i>
<i>¿Cómo detectar la fatiga mental?.....</i>	<i>16</i>
<i>Propuestas para la detección oportuna de Fatiga Mental.....</i>	<i>22</i>
OBJETIVOS.....	25
<i>Objetivo General.....</i>	<i>25</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>25</i>
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
<i>Participantes.....</i>	<i>26</i>
<i>Diseño Experimental y Procedimientos.....</i>	<i>26</i>
<i>Tarea Control.....</i>	<i>28</i>
<i>Tarea de Rendimiento Continuo.....</i>	<i>29</i>
<i>Tarea de Compatibilidad de Flancos.....</i>	<i>29</i>
<i>Tarea de Conteo.....</i>	<i>30</i>
<i>Registros.....</i>	<i>31</i>
<i>Registro de Temperatura Corporal.....</i>	<i>31</i>
<i>Registro de Conducta Ocular.....</i>	<i>32</i>
<i>Procesamiento y Análisis de Datos.....</i>	<i>32</i>

RESULTADOS.....	38
<i>Tarea de Rendimiento Continuo (CPT).....</i>	<i>38</i>
<i>Tarea de Compatibilidad de Flancos (FT).....</i>	<i>45</i>
<i>Tarea de Conteo (CT).....</i>	<i>48</i>
DISCUSIÓN.....	49
CONCLUSIONES.....	54
REFERENCIAS.....	56

RESUMEN

El fenómeno de fatiga mental impone riesgos y dificultades muy importantes para diversos rubros de la sociedad actual (aviación, industria de maquinaria pesada, conducción vehicular). Es por esto que su detección eficiente adquiere un especial interés. En la actualidad, se utilizan parámetros fisiológicos para su detección, tales como registro electroencefalográfico, conducta ocular y monitoreo cardiaco. Si bien estos métodos son sensibles, presentan limitaciones para su aplicación masiva en actividades de vida diaria, tales como el señalamiento tardío de indicadores de fatiga mental o dificultades técnicas de implementación (como la interferencia provocada por paneles automatizados en el registro de encefalografía).

Es así como resulta de especial relevancia estudiar metodologías de preferencia sencillas, de bajo costo, mínimamente invasivas y que se adapten al contexto en el cual se utilicen, en pos de favorecer su implementación masiva y práctica. Estudios recientes sugieren que la temperatura corporal periférica puede ser un candidato interesante como marcador de fatiga mental, que cumpla con estas características. Esto debido a que refleja las variaciones autonómicas asociadas a procesos cognitivos, permitiendo predecir desempeño para distintos tipos de actividades atencionales, que constituyen, precisamente, el área más sensible a los efectos deletéreos de la fatiga mental.

Es por esto que, como objetivo general de este estudio, se planteó determinar la asociación entre la variación de la temperatura corporal periférica y el rendimiento, parámetro operacional de fatiga mental, durante la ejecución de distintas tareas atencionales. En concreto, se comparan sus características como marcador fisiológico con otro ya establecido; parpadeos de larga duración. Para esto, se realizó un análisis exploratorio de la importancia predictiva de rendimiento atencional de distintas variables de temperatura y parpadeo, a través de la técnica de “machine-learning” bosques aleatorios de regresión (“random forest”). Posteriormente, con las variables fisiológicas de mayor importancia predictiva se

construyeron árboles de inferencia condicional, con la finalidad de comprobar esta importancia predictiva para la base de datos utilizada.

Esta metodología permitió establecer que la variación de temperatura corporal periférica durante el transcurso de las tareas tiene importancia predictiva del rendimiento atencional, particularmente en cuanto a tiempo de respuesta, lo que pudo ser comprobado para la base de datos construida. Además, los resultados apoyan el uso exclusivo del registro de temperatura a nivel del dedo índice (temperatura periférica) como marcador de fatiga mental, ya que su variación fue suficiente para determinar importancias predictivas de rendimiento atencional, no siendo necesario normalizar sus registros con la temperatura de la frente de los sujetos (temperatura de borde central).

De este modo, estos resultados respaldan el uso de la variación térmica periférica como marcador fisiológico de fatiga mental. Con esto se espera contribuir en el desarrollo de sistemas de detección que puedan ser implementados en diversos escenarios de la vida diaria en el largo plazo.

ABSTRACT

The phenomenon of mental fatigue imposes very important risks and difficulties for various sectors of today's society (aviation, heavy machinery industry, vehicular driving). That is why special attention must be paid to its efficient detection. At present, mainly physiological parameters are used for its detection, such as electroencephalographic records, ocular behavior and cardiac monitoring. Although these methods are sensitive, they present limitations for their mass application in activities of daily life, such as the late signaling of indicators of mental fatigue or technical difficulties of implementation (such as the interference caused by automated panels in the registry of encephalography).

This is why it is particularly important to study simple, low-cost, minimally invasive methodologies that adapt to the context in which they are used, in order to favor their mass and practical implementation. Recent studies suggest that peripheral body temperature can be an interesting candidate as a marker of mental fatigue that meets these characteristics. This is because it reflects the autonomic variations associated with cognitive processes, allowing prediction of performance for different types of attentional activities, which constitute precisely the most sensitive area to the deleterious effects of mental fatigue.

That is why, as a general objective of this study, it was proposed to determine the association between the variation of peripheral body temperature and performance, an operational parameter of mental fatigue, during the execution of different attentional tasks. Specifically, their characteristics are compared as a physiological marker with another already established: long-lasting blinks. For this, an exploratory analysis of the predictive importance of attentional performance of different variables of temperature and flicker was carried out, through the "machine-learning" technique, "random forest". Subsequently, conditional inference trees were constructed with physiological variables of greater predictive importance, in order to verify this predictive importance for the database used.

This methodology allowed us to establish that the variation of peripheral body temperature during the course of tasks has a predictive importance of attentional performance, particularly in terms of response time, which could be verified for the constructed database. In addition, the results support the exclusive use of the temperature record at the index finger (peripheral temperature) as a marker of mental fatigue, since its variation was sufficient to determine the predictive importance of attentional performance and it is not necessary to normalize its records with the temperature of the forehead of the subjects (central edge temperature)

Thus, these results support the use of peripheral thermal variation as a physiological marker of mental fatigue. This is expected to contribute to the development of detection systems that can be implemented in various scenarios of daily life, in the long term.

INTRODUCCIÓN

Los estados de fatiga mental representan un problema muy relevante, en rubros que requieren de alta precisión operativa, tales como la conducción de vehículos motorizados, la industria de maquinaria pesada o la aviación. En estos contextos, errores o descuidos en el accionar humano pueden derivar en consecuencias catastróficas y muchas veces letales (*Driskell & Salas, 1991; Noy et al., 2011*). De hecho, en el caso de la conducción vehicular, al menos un 20% de los accidentes de tráfico a nivel mundial, están relacionados directamente con episodios de fatiga mental (*Zhang et al., 2016*). Esto también se ve reflejado en la actividad aeronáutica, ya que si bien ocurren menos de un accidente aéreo con resultado de muerte por cada millón de vuelos realizados, se estima que sobre el 66% de estos siniestros son atribuibles a errores del piloto y su tripulación (*Dismukes, 2017*).

Debido a limitaciones técnicas que impiden implementar procedimientos de detección en línea, en áreas como la conducción vehicular profesional, así como en la aviación militar y comercial, hasta la fecha se privilegian protocolos de mitigación de fatiga mental a través de pautas de descanso mínimo, sueño y alimentación (*ICAO, 2017*). Considerando la importancia que reviste a nivel de seguridad operacional, es de gran interés desarrollar mecanismos y estrategias de detección de estados de fatiga mental, que sean suficientemente sensibles, específicos, no invasivos y oportunos. Esto permitirá minimizar los factores de riesgo ocupacional, la optimización del rendimiento e inclusive hacer mejoramientos de los programas preventivos.

En la actualidad, la evidencia apoya el uso de marcadores fisiológicos para la detección de fatiga mental, tales como registro electroencefalográfico, seguimiento de conducta ocular y monitoreo cardiaco (*Lehrer et al., 2010; Gaetan et al., 2015*). Sin embargo, su usabilidad se ve restringida por 2 razones fundamentales: dificultades técnicas de implementación (como la interferencia provocada por paneles automatizados en el registro de encefalografía) y el sentido

de oportunidad con el que se pueden detectar episodios de fatiga, ya que la información que entregan se relaciona a un deterioro muy importante en los parámetros de rendimiento (*Lehrer et al., 2010; Borghini et al., 2012; Hockey, 2013*).

Por lo tanto, si se considera que la importancia primordial de los marcadores de fatiga mental radica en su valor operativo, de modo que sean transportables y aplicables en entornos de trabajo diversos (conductores de vehículos motorizados, pilotos de aeronaves, controladores aéreos, cirujanos, etc.), es evidente la necesidad de desarrollar aproximaciones múltiples que se adapten al contexto de necesidades específicas. Es por esto que el presente estudio se aboca a la búsqueda de metodologías de detección oportuna de fatiga mental, que reporten una utilidad práctica en actividades de la vida diaria. Para esto se exponen a continuación aspectos generales de fatiga mental, con el fin de entender conceptualmente lo que representa, para luego describir en detalle sus sistemas de medición y finalmente, proponer una metodología que permita optimizar su detección.

¿Qué es la Fatiga Mental?

Desde los tempranos estudios de las décadas de 1930-1940 hasta nuestros días, el fenómeno de fatiga mental se conceptualiza como un estado que afecta a un sujeto, sometido a una tarea prolongada que involucra recursos cognitivos, tales como atención, memoria de trabajo, procesamiento de información, etc. (*Luckiesh & Moss, 1937; Luckiesh, 1947; Stern et al., 1994*). Concretamente, a medida que transcurre el tiempo durante una tarea, se percibe una sensación creciente de cansancio mental, en paralelo a una disminución de su desempeño respecto a la tarea primaria. A diferencia de otros procesos relacionados con perturbación en el rendimiento, como lo es la somnolencia, la fatiga mental tiende a revertirse frente al descanso o al suspender la tarea en curso, en tanto el reposo favorece la sensación de somnolencia (*Borghini, et al., 2012*).

La interpretación inicial de la ocurrencia de fatiga mental, consideraba que producto de un trabajo excesivo, ocurría una pérdida de las limitadas fuentes de energía mental disponibles, impidiendo que el sujeto ya fatigado pudiera iniciar o mantener conductas orientadas a metas en forma eficiente (*Griffith et al., 1950*). Bajo esta lógica lineal, la fatiga mental se entendería como una depleción de energía mental, un punto sin retorno de las capacidades cognitivas; sin embargo, investigaciones posteriores han expuesto evidencia sugiriendo que el problema es considerablemente más complejo. Por ejemplo, existen diversos factores individuales y medioambientales, como estados emocionales (*Hockey, 2013*), motivaciones externas (*Hopstaken et al., 2016*), nivel de involucramiento en la tarea (*Hopstaken et al., 2015*), fases del ciclo circadiano (*Di Milia et al., 2011*), entre otros, que influyen significativamente sobre la conducta orientada a metas. Esto explicaría cómo sujetos ya fatigados pueden recuperar un desempeño efectivo y pueden continuar con tareas de elevada carga cognitiva, si se alcanzan niveles de motivación adecuados (*Hopstaken et al., 2016*). Esta evidencia apoya la idea que es posible movilizar y reclutar recursos cognitivos, aún desde estados de fatiga mental previos, sugiriendo que de existir una fuente única, su administración es contexto dependiente. Al mismo tiempo, pudiera haber múltiples fuentes de alerta que contrarrestan la fatiga mental, tales como factores motivacionales, emocionales, atencionales y/o circadianos.

Otro tipo de aproximación al concepto de fatiga mental enfatiza su rol como mecanismo adaptativo de advertencia, como señal para que el sujeto fatigado realice un análisis de costo/beneficio entre proseguir la conducta en curso (explotar el medio) versus detenerse y buscar otro tipo de actividades (explorar el medio) (*Boksem & Tops, 2008; Inzlicht et al., 2014*). Por lo tanto, representaría un conflicto decisional entre continuar con lo que se está realizando o iniciar otras actividades alternativas (*Hockey, 2013*). Este tipo de enfoque resulta satisfactorio en cuanto a que explica la naturaleza transiente y fluctuante de la fatiga mental, susceptible de ser inducida o minimizada por múltiples variables inherentes o ajenas al sujeto. Por consiguiente, no se configura como un estado persistente o insalvable una vez que se percibe al realizar una actividad cognitiva.

Del mismo modo, estudios basados en tareas atencionales indican que, independiente de los estímulos percibidos y a pesar de reportar un estado de vigilia adecuado, la atención también fluctúa de manera involuntaria durante el transcurso de la tarea, muchas veces enfocada en el acontecer mental, fenómeno conocido como “mind wandering” (*Thomson et al., 2015; Albert et al., 2017*). Esto ocurre a pesar de intentos conscientes por mantener la atención sobre la tarea primaria, sugiriendo un menoscabo operativo de las capacidades atencionales a mayor tiempo en la tarea (*Boksem et al., 2005*).

En suma, los diversos enfoques que abordan el concepto de fatiga mental tienden a converger en al menos 3 características primarias: corresponde a un estado mental (por lo tanto su naturaleza es transiente y fluctuante), susceptible a influencias medioambientales (tanto externas como inherentes al sujeto, voluntarias o inconscientes) y su probabilidad de expresión aumenta al ejecutar tareas monótonas y prolongadas. Un cuarto aspecto, no menos relevante, tiene relación con cómo se puede medir u objetivar las manifestaciones de fatiga mental. En este sentido, los indicadores subjetivos tales como el auto-reporte de fatiga, presentan diversas fuentes de sesgo que limitan su precisión y sensibilidad. Esto debido a que la conducta psicológica de muchos sujetos favorece la tendencia a no revelar sensaciones displacenteras, episodios de inatención o de sobrecarga cognitiva, por considerarlas muestras de “debilidad” (*Butcher, 1994*). A su vez, se produce una distorsión inherente al recuerdo de eventos recientemente vivenciados y a la valoración subjetiva de la experiencia respecto a la tarea (*Gaetan et al., 2015*), dificultando el registro confiable de datos. Por lo tanto, como no se puede medir directamente, en diversas investigaciones se ha optado por operacionalizar las manifestaciones de fatiga mental a través del desempeño en tareas cognitivas (*Lehrer et al., 2010; Borghini et al., 2012; Hockey, 2013*), asumido como un factor inversamente asociado a fatiga mental. De este modo, es a través de variables de rendimiento, tales como precisión en la tarea primaria o tiempo de respuesta, que se puede objetivar la presencia de fatiga mental y comparar la relevancia de distintos marcadores fisiológicos. Para la presente investigación se utilizan ambas variables de rendimiento como expresión de fatiga mental.

Finalmente, cabe destacar que el marco operativo en que se estudian los fenómenos de fatiga mental ha cambiado con el correr de las décadas. Esto es debido a que el tipo de actividades con mayor sensibilidad al impacto deletéreo de fatiga también ha cambiado con el tiempo. Los avances tecnológicos característicos de la sociedad moderna, han implicado una automatización creciente de instrumentos y procesos que previamente dependían en forma casi exclusiva del accionar humano (*Wanyan et al., 2011*). En diversos rubros, tales como aviación, industria, informática, etc., el desempeño ocupacional se expresa en la interacción entre el factor humano y la máquina. El rol de operarios ha mutado, desde realizar tareas eminentemente manuales hacia ejercer funciones de supervisión y monitoreo de distintos sistemas automatizados. Así, la capacidad de mantener niveles de atención adecuados, durante períodos de tiempo prolongados, es uno de los componentes principales que contribuyen a un óptimo rendimiento (*Wanyan et al., 2014*). Progresivamente se ha transitado desde sistemas con múltiples tareas que requerían continuos cambios atencionales a sistemas donde sólo existe una tarea; vigilar marcadores. En este sentido, cobra especial interés el identificar oportunamente estados de fatiga mental y su símil operativo como es el rendimiento atencional, tanto para efectos de seguridad como en pos de un mejoramiento productivo. Con este objetivo, se han reportado en la literatura distintos sistemas de detección de fatiga mental, cada uno de ellos con bondades y dificultades propias en cuanto a implementación.

¿Cómo detectar la Fatiga Mental?

Durante la ejecución de una tarea que reviste una demanda cognitiva, diversos mecanismos psicofisiológicos adaptativos se activan, con el fin de hacer frente a las exigencias del medio (*Jansen et al., 1995*). Estos mecanismos ejercen su acción, en forma refleja e involuntaria, a través de modificaciones a nivel del sistema autónomo, favoreciendo el reclutamiento de recursos atencionales y dirigiendo la atención hacia los estímulos de interés. La activación autonómica en

respuesta a las demandas del medio, involucra modificaciones en diversos órganos y sistemas, tales como el sistema nervioso central, cardiovascular, motor, sensorial, entre otros (*Jansen et al., 1995*). En términos conductuales y objetivos, es posible realizar una aproximación acerca del estado atencional de un sujeto, a través del registro de parámetros fisiológicos que se verán modificados como parte de la respuesta autonómica en curso, tales como vasoconstricción periférica, dilatación pupilar, variación en la frecuencia de ritmo cardíaco, etc. (*Kreibig, 2010; Lehrer et al., 2010*). Del mismo modo, al asociar el estado atencional y las variaciones de estos parámetros fisiológicos, con indicadores de rendimiento respecto a la tarea primaria (tales como precisión y tiempo de respuesta), ha sido posible detectar y caracterizar episodios de fatiga mental a medida que transcurre el tiempo en la tarea (*Borghini, et al., 2012*).

Basados en la asociación entre estado atencional y activación autonómica, diversos estudios en fatiga mental han utilizado parámetros fisiológicos como metodología preferente, para su detección en tareas de elevada carga cognitiva (*Borghini, et al., 2012*). La evidencia reportada hasta la fecha, apoya el uso de registros electroencefalográficos, el seguimiento de la conducta ocular y el monitoreo de la actividad cardíaca, ya que han sido consignados como los parámetros con mayor respaldo respecto a su sensibilidad (*Rowe et al., 1998; Schellekens et al., 2000; Di Stasi et al., 2013; Wanyan et al., 2014; Möckel et al., 2015*).

A diferencia del uso exclusivo de auto-reporte, a través de electroencefalograma, ha sido posible caracterizar estados de elevada carga cognitiva (al realizar tareas de conducción vehicular y de simulación de vuelo) y su transición hacia estados de fatiga mental (*Borghini et al., 2012*). Concretamente, se han observado incrementos en el poder de banda theta, así como disminución de poder en banda alfa, al realizar tareas de elevada carga cognitiva. Una vez reportado el estado de fatiga mental, el perfil electroencefalográfico muestra incrementos en el poder de bandas theta, delta y alfa, con un 90% de precisión en la detección de estas transiciones (*Borghini et al., 2012*). En forma similar, en

estudios de simulación de vuelo, se ha estudiado cómo el piloto direcciona sus recursos atencionales de manera involuntaria (*Wanyan et al., 2014*). Para esto se utilizó encefalografía. Los resultados indican que durante operaciones de vuelo con cargas cognitivas muy elevadas, así como en tareas muy extensas, ocurre un deterioro del desempeño del piloto, asociándose a una disminución del pico de la amplitud del potencial evocado a un estímulo auditivo P3a, en zonas fronto-centrales. Esto sugiere que en estados de fatiga mental, la capacidad del piloto de responder a estímulos súbitos o potencialmente significativos, como el sonido de una alarma, es considerablemente menor respecto a estados de vigilia sin fatiga. Asimismo, vale la pena notar que lo que se está midiendo no es un cambio deliberado y a voluntad de la atención, sino precisamente un cambio atencional gatillado por una señal de peligro. Esta evidencia apoya que lo que se entiende por fatiga mental, correspondería a una reducción en el sistema de alerta, restando capacidad operativa del sujeto en situaciones de alto riesgo ocupacional.

Por otra parte, uno de los registros fisiológicos más evidentes de cambio autonómico corresponde a la frecuencia cardiaca. Esta medida también ha sido utilizada para predecir el estado de fatiga mental, siendo además una opción razonable al tratarse de una metodología relativamente simple y de bajo costo. En efecto, ha sido utilizada exitosamente como instrumento de estimación de carga cognitiva, rendimiento y fatiga mental, principalmente en estudios de operaciones de vuelo simuladas (*Lehrer et al., 2010*). Habitualmente se emplea la variabilidad del ritmo cardiaco (“Heart Rate Variability” o HRV) por sobre la frecuencia cardiaca, ya que representa en forma más precisa el balance autonómico simpático/parasimpático, por ende la capacidad adaptativa del sujeto frente a diversos estresores (*Berntson et al., 1997*). Una elevada variabilidad de ritmo cardiaco, representaría el estado fisiológico óptimo desde el punto de vista de rendimiento, frente a tareas repetitivas, prolongadas y monótonas, tal y como fue reportado por *Lehrer et al. (2010)*. En contraste, frente al reporte de fatiga mental en tareas prolongadas y/o de muy elevada carga cognitiva, se observa un deterioro en las variables de desempeño (precisión, tiempo de respuesta) asociado a la disminución de la variabilidad de ritmo cardiaco (*Lehrer et al., 2010; Wanyan et al.,*

2014; Mansikka et al., 2016). Esto reflejaría una menor capacidad de activación autonómica al experimentar fatiga mental.

Por último, considerando que frente a demandas cognitivas del medio se requiere una rápida exploración visual para la evaluación del riesgo y alternativas de acción, la conducta ocular también debería ser un buen predictor de fatiga mental. En efecto, esto ocurre para distintas características del registro. Entre las variables con mayor respaldo en su rol de marcador fisiológico se consideran a la velocidad de sacadas, la variación del diámetro pupilar y el perfil de parpadeo (*Stern et al., 1994; Di Stasi et al., 2013; Wanyan et al., 2014*). El estudio de la relación entre amplitud y velocidad de sacadas, a través del análisis de la secuencia principal, indica que al aumentar el tiempo en la tarea, disminuyen progresivamente los picos de velocidad tanto para sacadas como microsacadas (*Hirvonen et al., 2010; Di Stasi et al., 2013*). Esto ocurre preferentemente en tareas monótonas y prolongadas, no importando la complejidad de la tarea primaria. En cuanto al diámetro pupilar, se ha observado un aumento en forma progresiva al aumentar la carga cognitiva de una tarea (*Wanyan et al., 2014*). Sin embargo, para cargas muy elevadas, el diámetro pupilar tiende a regresar a valores basales, representando un estado de sobrecarga cognitiva o fatiga mental. Este marcador muestra una asociación significativa con episodios de fatiga mental, pero se ve limitado en su aplicabilidad por las condiciones lumínicas del entorno (*Wanyan et al., 2014*).

Finalmente, el análisis de conducta ocular incluye un parámetro relacionado con el parpadeo del sujeto, que resulta muy interesante como marcador de fatiga mental y corresponde a la prolongación de los parpadeos o parpadeos de larga duración (*Stern et al., 1994; Morris & Miller, 1996*). Se ha observado que durante tareas con demanda cognitiva importante, ocurre una prolongación progresiva del tiempo de parpadeo, asociándose en forma significativa con el deterioro de las variables de rendimiento, incluso desde momentos tempranos durante la ejecución de la tarea (*Morris & Miller, 1996; Caffier et al., 2003*). Para distintas tareas y en diversos escenarios, se ha reportado que el aumento del tiempo promedio de duración del parpadeo, por sobre los 300-400 milisegundos, se asocia a disminución

del desempeño. En específico, esto ha sido registrado en investigaciones sobre conducción vehicular (*Pfaff et al., 1976*), operaciones de vuelo (*Morris & Miller, 1996*) y otras tareas atencionales monótonas y prolongadas (*Stern et al., 1994; Caffier et al., 2003; Borghini et al., 2012*). Esta evidencia apoya el uso del registro de parpadeos de larga duración como marcador fisiológico de fatiga mental, que permita detectar indicios iniciales de fatiga. De hecho, para el presente estudio, se utiliza como marcador de comparación de fatiga mental, para distintas tareas atencionales.

La evidencia presentada hasta ahora para estos parámetros fisiológicos (entiéndase registros electroencefalográficos, de variabilidad cardíaca y de conducta ocular), apoyan su rol como marcadores de fatiga mental. Sin embargo, al realizar un análisis crítico de la literatura especializada, resaltan dificultades de distinta índole que impiden su implementación masiva y en situaciones más ecológicas (*Philip, 2005*). Esto se debe a que las investigaciones respecto a carga cognitiva y detección de fatiga mental, aún son escasas y circunscritas a un reducido número de sujetos de experimentación, efectuándose en su mayoría bajo condiciones de laboratorio (*Besson et al., 2013*), limitando la transferencia de sus conclusiones a prácticas de la vida diaria. Probablemente el ejemplo más emblemático de la dificultad de transferencia al mundo real es la electroencefalografía, dado que existen impedimentos técnicos para su implementación masiva, tales como la interferencia basal que provocan los paneles de instrumentos automatizados en el registro. A su vez, los escasos estudios que abordan el rol de la variabilidad de ritmo cardíaco indican que su mayor impacto como marcador ocurre a muy elevadas cargas cognitivas, por lo que ocurre un desfase entre la valiosa información aportada y la oportunidad de aminorar o revertir los efectos deletéreos de la fatiga mental (*Lehrer et al., 2010; Wanyan et al., 2014; Mansikka et al., 2016*).

Esto hace aún más evidente, la necesidad de continuar en la búsqueda de marcadores de fácil implementación, que se adapten a diferentes contextos de trabajo. Por otra parte, si bien estos marcadores fisiológicos tienen buen desempeño

en términos poblacionales, son deficientes en la predicción específica debido a variabilidad interindividual (*Lehrer et al., 2010; Gaetan et al., 2015*). Esto es atribuible a características personales (expresión emocional, personalidad, experiencia previa en la tarea, entre otras) como a circunstanciales (por ejemplo, motivación externa). Por estas razones, las manifestaciones de fatiga mental tienden a divergir entre sujetos e incluso para un mismo sujeto en distintos momentos. Una forma de abordar estas dificultades, ha sido el uso conjunto de estos marcadores fisiológicos, lo que ha mostrado un efecto sinérgico entre las distintas técnicas, mejorando la eficiencia del análisis y detección de fatiga (*Áng et al., 2005; Sequeira et al., 2009*); evidentemente, esto provoca que el proceso de registro sea más engorroso aún y, por lo tanto, menos transferible a escenarios más ecológicos, de la vida cotidiana. Pareciera que hasta ahora se cuenta con buenos marcadores de fatiga, pero su implementación práctica resulta muy difícil, por lo que se requiere innovar hacia técnicas poco sofisticadas, adaptables a diversos contextos y oportunas.

Por lo tanto, una metodología óptima de detección de fatiga mental debiera no sólo ser sensible y específica, también debe asegurar el desarrollo normal de la tarea primaria (ser mínimamente invasiva) y ser oportuna (*Luximon & Goonetilleke, 2001*). Al mismo tiempo, teniendo en cuenta la automatización de los procesos operativos de las últimas décadas, el horizonte de las investigaciones sobre fatiga mental debiera estar enfocado en la obtención de múltiples marcadores de fatiga, que privilegien la fácil implementación, acompañado de los distintos perfiles atencionales que pudieran afectarse por este fenómeno, ya que constituyen la tarea primaria y nuclear en dichos procesos. Es por esto, que en el presente estudio, se propuso analizar marcadores que cumplan estas características, puestos a prueba en distintas tareas atencionales.

Propuestas para la detección oportuna de Fatiga Mental

Como se ha señalado, el diseño actual de los sistemas de detección de fatiga mental se basa en la asociación entre indicadores de desempeño y parámetros fisiológicos, los cuales reflejan la activación autonómica asociada al reclutamiento de recursos cognitivos (*Borghini, et al., 2012*). Con el fin último de favorecer su aplicabilidad en la vida diaria, estos sistemas de detección debieran enfocarse en actividades atencionales, ya que son éstas las tareas primordiales de diversos rubros en la actualidad (aeronáutica, industrial, etc.), producto de la automatización progresiva de sus procesos operativos (*Wanyan et al., 2014*). Sin embargo, la literatura especializada sólo reporta a grosso modo, un detrimento atencional a nivel general a medida que transcurre el tiempo en la tarea (*Borghini et al., 2012; Hopstaken et al., 2015; Hopstaken et al., 2016*). De este modo, lo relevante sería distinguir si existe un impacto diferencial de la fatiga mental, para distintos tipos de actividad atencional que pudieran ser predominantes en contextos laborales específicos (por ejemplo, en algunos pudieran predominar tareas de atención sostenida, en otros la resiliencia respecto a distractores o la disponibilidad de recursos atencionales, etc.), con un énfasis en la captura de momentos en que el rendimiento atencional decaiga, que es finalmente el mayor riesgo operacional asociado a fatiga mental por la mayor probabilidad de errores y accidentes.

Bajo el marco teórico propuesto, cualquier cambio autonómico gatillado por la ejecución de actividades que demanden recursos cognitivos, podría ser a su vez utilizado como marcador de alerta/fatiga. Entre las modificaciones fisiológicas del tono autonómico más evidentes y hasta ahora no exploradas, se cuentan los cambios vasculares periféricos que privilegian el flujo sanguíneo hacia grandes músculos y órganos internos, incluyendo el sistema nervioso central (*Kreibig, 2010*). Estas variaciones derivan en vasoconstricción periférica al realizar una tarea, lo que conlleva necesariamente a la reducción de la temperatura de dichas zonas (*Romanovsky, 2014*). En efecto, el registro de la temperatura corporal periférica resulta de gran interés, principalmente debido a reportes recientes realizados en el

Laboratorio de Neurosistemas de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile (*Vergara et al., 2017*), que respaldan su capacidad de predecir rendimiento para distintas tareas atencionales. Así, el cambio en la temperatura periférica sería capaz de dar cuenta de la variabilidad atencional durante una tarea con carga cognitiva, por ende identifica episodios de fatiga mental de forma más específica. Cabe destacar, de acuerdo a lo reportado por *Vergara et al. (2017)*, que el descenso de la temperatura periférica durante una tarea atencional, se desmarca de la estabilidad observada para la temperatura ambiente o corporal central (medidas a nivel timpánico y en la frente del sujeto), por lo que su perfil como parámetro fisiológico de actividad atencional y fatiga mental se adapta a las indicaciones sugeridas por *Luximon & Goonetilleke (2001)*.

Respecto a la implementación práctica de los sistemas de detección de fatiga mental, resulta esencial que éstos no interfieran con la ejecución de la tarea primaria. En vez de metodologías técnicamente dificultosas de implementar, se debieran privilegiar registros sencillos, poco sofisticados, de fácil aplicación masiva y de preferencia de bajo costo. En este terreno, nuevamente la medición de la temperatura corporal periférica pareciera ser un objeto de estudio promisorio. En términos de oportunidad, se espera que la detección de fatiga mental se realice en forma precoz una vez se presenta, con el fin de evitar eventos adversos y menoscabo de rendimiento. En este sentido, algunas mediciones se expresan con prontitud una vez el sujeto reporta sensación de fatiga mental, tales como el registro de parpadeos de larga duración (*Stern et al., 1994*). No obstante, estos eventos suelen estar más relacionados con el ciclo circadiano y la necesidad de conciliar sueño, que con cambios de foco atencional o cantidad de recursos atencionales depositados en la tarea. Por lo tanto, sería interesante evaluar la capacidad de detección precoz de fatiga mental de un parámetro innovador, como lo es la temperatura corporal periférica, comparándolo con otro parámetro oportuno, esta vez conocido, como resulta ser la prolongación del tiempo de parpadeo.

En suma, los sistemas de detección de fatiga mental en la actualidad, presentan distintas dificultades a nivel de implementación en forma masiva. Por lo tanto, se debiera continuar en la búsqueda de marcadores fisiológicos, privilegiando una orientación práctica y enfocándose en cumplir estándares de sensibilidad, especificidad, oportunidad y de mínima invasividad. Las tareas primordiales a evaluar son las que implican actividades atencionales de modo preferente, distinguiendo entre los distintos tipos de atención comprometida. Para la presente investigación, se propuso el estudio de las propiedades de la temperatura corporal periférica, como marcador fisiológico de fatiga mental en diversas tareas atencionales, comparándola con un marcador conocido, como lo es los parpadeos de larga duración. El objetivo a largo plazo, en futuros estudios, es de transferir su utilidad a escenarios ecológicos, con aplicación práctica en la vida diaria.

OBJETIVOS

El presente proyecto está orientado hacia el ámbito profesional, por lo que más que una hipótesis explicativa de un fenómeno, se plantea el siguiente objetivo general.

Objetivo General

Evaluar si la temperatura corporal periférica predice igual o de mejor manera episodios de fatiga mental, para distintas tareas atencionales, que la duración de parpadeos.

Objetivos Específicos

- Evaluar el desempeño de los parpadeos de larga duración como marcador de fatiga mental.
- Evaluar el desempeño de la temperatura corporal periférica como marcador de fatiga mental.
- Establecer una comparación entre parpadeos de larga duración y temperatura corporal periférica, respecto a si alguno de estos parámetros presenta un mejor desempeño como predictor de fatiga mental.
- Evaluar si ambos parámetros en conjunto presentan mejor desempeño como predictores de fatiga mental, que cada uno por sí solo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Participantes

En términos operativos, para el presente proyecto se analizaron los datos y registros ya extraídos en la investigación de Vergara *et. al.* (2017). En ese estudio, se reclutaron 40 sujetos voluntarios, 20 mujeres y 20 hombres, estudiantes de la Universidad de Chile, quienes fueron reclutados a través de redes sociales. Las edades de los sujetos comprendieron entre los 19 y los 36 años, con un promedio de 25.22 ± 4.92 años. Todos los participantes reportaron una visión normal o corregida, ninguno reportó antecedentes de trastornos neurológicos o psiquiátricos. El tamaño de muestra utilizado fue estimado en base al tamaño de efecto de resultados preliminares y resultados de metaanálisis y revisiones del tema. Este estudio cuenta con la aprobación del Comité de Ética para la Investigación en Humanos de la Facultad de Medicina en la Universidad de Chile, número de proyecto ID 060-2015, ACTA AP-65. Todos los participantes dieron su consentimiento informado por escrito, siguiendo la Declaración de Helsinki.

Diseño Experimental y Procedimientos

Todos los sujetos asistieron a una sola sesión de trabajo, siendo ubicados en una silla mirando de frente un monitor, en donde se presentaron las tareas conductuales a ejecutar. Éstas consistieron en una Tarea Control (Baseline Task o BT) y tres tareas que representaron distintas capacidades atencionales: una Tarea de Rendimiento Continuo para evaluar atención sostenida (Continuous Performance Task o CPT), una Tarea de Compatibilidad de Flancos para evaluar resiliencia frente a distractores (Flanker Task o FT) y una Tarea de Conteo para

evaluar reclutamiento de recursos atencionales (Counting Task o CT), cada una de 10 minutos de duración aproximadamente (Figura 1).

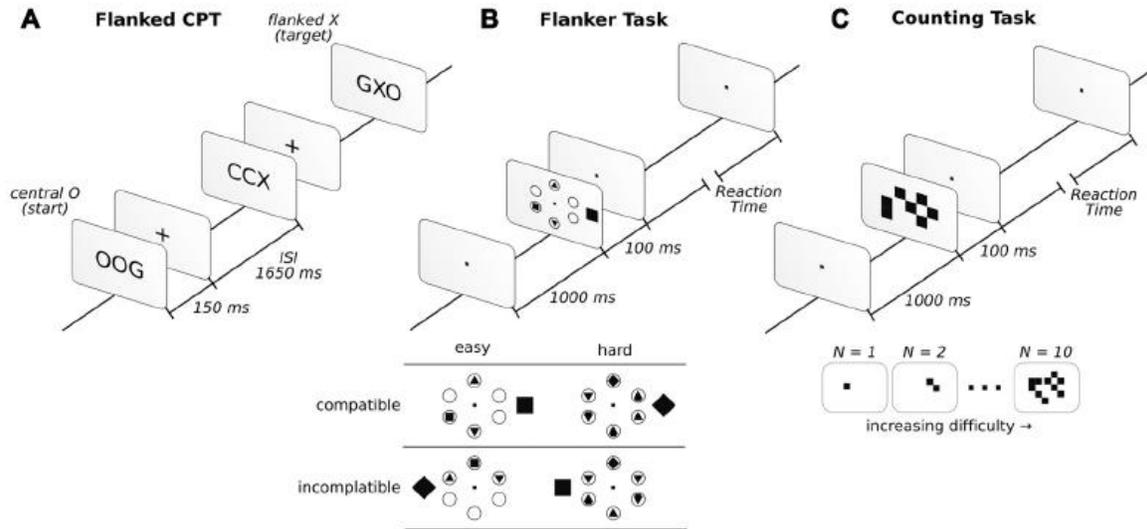


FIGURA 1 | Descripción de las tres tareas atencionales en el orden en que se realizaron. Antes de comenzar las tareas atencionales, se estableció una línea de base (BT) con la instrucción "siéntese y relájese, manteniendo vigilia". En la Tarea de Rendimiento Continuo (CPT; **A**), los participantes tuvieron que informar si la secuencia de letras centrales "O-cualquier letra-X" apareció. En la Tarea de Compatibilidad de Flancos (FT; **B**), los participantes tuvieron que reportar si aparecía un cuadrado o un diamante dentro de uno de seis círculos. Si la figura objetivo al interior del círculo (cuadrado o diamante) coincidía con la figura presentada por fuera de los círculos, se consideró como ensayo compatible, mientras que los que no coincidían se consideraron incompatibles. En la Tarea de Conteo (CT; **C**), los participantes tuvieron que informar el número de cuadrados observados. Reproducción con permiso de: Vergara, R. C., Moënné-Loccoz, C., & Maldonado, P. E. (2017). Cold-blooded attention: finger temperature predicts attentional performance. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 454.

Como se describe en Vergara *et al.* (2017), las pruebas preliminares durante la aplicación de este protocolo experimental, indicaron un efecto acumulativo en la temperatura medida de la punta del dedo, lo que reduciría la comparabilidad de los resultados entre las distintas tareas. Dado que el objetivo de emplear distintas tareas era examinar si las variables termorreguladoras podrían predecir el rendimiento en más de una tarea de atencional, además de considerar que el orden aleatorio de las tareas aumentaría significativamente el tamaño de la muestra necesario para detectar tales efectos, se decidió que 19 de los 40 sujetos realizaran

las tareas en un orden fijo. Basado en el reporte de los participantes y para asegurar el compromiso en la ejecución de la tarea, se ordenaron desde la informada como más monótona a la más desafiante, con la siguiente disposición: BT, CTP, FT y CT. Esta secuencia permitió aumentar la comparabilidad de los resultados para una misma tarea pero disminuyendo la comparabilidad entre las distintas tareas, por lo que se dispuso que los sujetos restantes recibieran pseudoaleatoriamente el orden de las siguientes tareas atencionales. Específicamente, este orden fue contrabalanceando y no se utilizó el orden fijo de la primera mitad de la muestra. Esto permitió explorar los efectos específicos de cada tarea, teniendo suficiente muestra para compensar el efecto acumulativo antes descrito. Es importante destacar que los últimos 21 sujetos con tareas atencionales en orden pseudoaleatorio no fueron analizados en el reporte de *Vergara et al. (2017)*.

Tarea Control

La Tarea Control (Baseline Task o BT) tuvo como objetivo medir la variación basal de la temperatura corporal, a modo de referencia. En esta tarea, se les solicitó a los participantes que permanecieran sentados, frente a una pantalla de monitor, privilegiando un estado relajado. Este estado debía mantenerse por un período aproximado de 10 minutos (tiempo aproximado de duración de cada una de las tareas restantes). A cada uno de los sujetos se les dio la siguiente instrucción: "Siéntese mirando la pantalla y relájese. Por favor, no se duerma e intente no cerrar los ojos por largos períodos de tiempo". Esta instrucción se dio para lograr un estado de relajación, pero manteniendo la vigilia. Todos los sujetos realizaron esta tarea al inicio de los ensayos.

Tarea de Rendimiento Continuo

El propósito de la Tarea de Rendimiento Continuo (Continuous Performance Task o CPT) es evaluar la atención sostenida del sujeto, a través de la detección de una secuencia de letras de baja frecuencia de aparición (10-15%). Para esto, a cada participante le fueron presentadas pantallas con tres letras durante 150 ms, seguido de una cruz de fijación durante 1650 ms. La letra central corresponde al objetivo de interés, flanqueada a ambos lados por letras a modo de distracción. El objetivo primordial de la tarea consiste en detectar una secuencia específica de letras centrales, a través de los distintos ensayos. Para esto debe recordar la secuencia de 2 ensayos anteriores (2-back task), de modo que si la letra central es “X” y, dos ensayos más atrás, la letra central fue una “O”, no importando qué letra central se encontraba en el ensayo previo (secuencia “O-cualquier letra-X”), los participantes debieron informar presionando un botón (Condición “Vaya/Ejecute” o “Go condition”). Si el sujeto reportó observar esta secuencia cuando no estaba presente, se consideró como falsa alarma (Condición “Falsa Alarma” o “False Alarm Condition”). En la Figura 1A se describe la tarea en forma abreviada. La Condición “Vaya/Ejecute” fue presentada en forma aleatoria en el 15% de 400 ensayos en total. Para los ensayos sólo se incluyeron las letras C, G, O, Q, H y X. Todos los participantes tuvieron que detectar la misma secuencia de letras de interés. Para este estudio, se seleccionó una versión de alta dificultad, con el fin de evitar el “efecto techo” (*Riccio et al., 2002*).

Tarea de Compatibilidad de Flancos

La Tarea de Compatibilidad de Flancos (Flanker Task o FT), reportada por *Green & Bavelier (2003)*, mide la capacidad de resiliencia del sujeto respecto a distractores. Para esto, se presentaron pantallas con seis círculos de 0,5° equidistantes desde el centro (2.1°), dispuestos en forma circular. En cada ensayo, se presentó una figura

objetivo al interior de alguno de los círculos. Ésta podía ser un cuadrado o un diamante, de modo que los participantes debían reportar cuál de las 2 figuras se trataba. Los círculos restantes podían estar en blanco o contenían diferentes figuras geométricas, como triángulos y círculos rellenos, a modo de distractor. A su vez, se dispuso un distractor fuera de los círculos que podía tener la forma de un cuadrado o de un diamante. Este distractor podía ubicarse por dentro (a $0,5^\circ$ desde el centro, a la izquierda o a la derecha) o por fuera de la matriz (a 4.2° desde el centro). El tamaño del este distractor fue de 0.3° cuando se presentó por dentro de la matriz circular, en tanto que al presentarse afuera, su tamaño correspondió a 0.9° . En ninguna condición se presentaron diamantes y cuadrados al interior de los círculos en forma simultánea, para un mismo ensayo. Se establecieron 2 niveles de dificultad, con cuatro (condición fácil) o seis (condición difícil) círculos con figuras geométricas, distribuyéndose de manera uniforme durante 320 ensayos. Además, se dispuso que la mitad de los ensayos fueran compatibles (condición en que el distractor fuera de la matriz circular coincidía con la figura objetivo), en tanto la otra mitad fue incompatible (el distractor externo a la matriz no coincidió con la figura objetivo). Cada pantalla se presentó durante 100 ms, seguido por una cantidad ilimitada de tiempo para responder. Los participantes debían responder para continuar la tarea. Una vez entregada la respuesta, se mantuvo un punto de fijación por 1000 ms. En la Figura 1B se expone una descripción abreviada de la tarea.

Tarea de Conteo

La Tarea de Conteo (Counting Task o CT) tiene como objetivo medir la capacidad de reclutamiento de recursos atencionales del sujeto. Siguiendo las indicaciones de *Green & Bavelier (2003)*, para esta tarea se presentaron pantallas con un número aleatorio de cuadrados. Los participantes debían reportar el número de cuadrados observados. Los cuadrados ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) se distribuyeron al azar en una matriz de $10^\circ \times 10^\circ$ centrada en la pantalla. El conjunto de cuadrados se exhibió durante 100 ms, seguido de una cantidad ilimitada de tiempo para responder. Fue

necesaria alguna respuesta para continuar la tarea. Una vez emitida la respuesta, se mantuvo un punto de fijación por 1000 ms. La dificultad de la tarea fue modulada a través del número de cuadrados presentados, que podían ser de uno a diez, en cualquier lugar de la matriz. Se dispuso una distribución uniforme para cada número de cuadrados durante los 200 ensayos realizados. La Figura 1C muestra una descripción abreviada de la tarea.

Registros

De acuerdo al protocolo experimental diseñado por *Vergara et al. (2017)*, se incluyeron medidas de temperatura corporal y una segunda de carácter conductual, que involucra seguimiento de conducta ocular. Estos últimos registros no formaron parte del reporte señalado.

Registro de Temperatura Corporal

Una hora antes de la llegada al laboratorio del participante, se estableció una temperatura ambiente constante, que debía estar en el rango de los 18° y 26° C. El rango de temperatura fue elegido en base a estudios previos de temperatura ambiente (*Schilder et al., 2014*). Cada participante estuvo sometido a la misma temperatura ambiental durante toda la sesión experimental, que no varió en más de 1°C. Desde la llegada del sujeto al laboratorio, se utilizaron 30 minutos adicionales en la descripción del experimento y lectura y firma del consentimiento informado. Teniendo en cuenta que la vasoconstricción periférica para la termorregulación, alcanza su meseta aproximadamente a los 15-20 minutos después de un cambio de temperatura ambiente (*Charkoudian, 2003*), seguido de manera casi idéntica por la temperatura de la piel (*Iampietro, 1971*), se consideró que el tiempo de estadía en el laboratorio antes del experimento fue suficiente para la aclimatación. Se

realizaron mediciones de cuatro tipos de temperatura: a nivel de tímpano (temperatura corporal central), en la frente (temperatura de borde central), en la punta del dedo índice (temperatura de borde periférico) y temperatura ambiente (de la habitación). Para medir estos cuatro tipos de temperatura, se confeccionó un dispositivo con tres termómetros Dallas DS18B20, un termómetro infrarrojo MLX90614 y un microcontrolador Arduino UNO.

Registro de Conducta Ocular

La conducta ocular fue registrada a través de un sistema de registro oculográfico infrarrojo de seguimiento ocular y pupilar de 500Hz (Eyelink II, SR Research Ltd., Mississauga, Canadá). Antes de proceder con cualquier tarea, se efectuó una calibración de 9 puntos hasta obtener un error menor a 0,5°. La posición del ojo fue muestreada binocularmente a una resolución espacial de 0.01 °.

Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento de datos fue diseñado con el objetivo de establecer importancias predictivas de las variables fisiológicas de parpadeo y temperatura respecto al rendimiento atencional. Para esto, se optó por una estrategia de “feature extraction”, técnica ampliamente utilizada en procesos de “data mining”. Este es un procedimiento de reducción de dimensionalidad, que permite la construcción de variables o características más manejables a partir de un gran conjunto de datos sin procesar. Estas características, además de ser informativas y no redundantes, describen con precisión el comportamiento general de los datos globales. A través de esta técnica se definieron 2 grandes grupos de variables: Variables Dependientes, que corresponden a las variables de rendimiento atencional, lo que se desea predecir, que representan la medida operacional de fatiga mental. Por otra

parte, se definieron Variables Independientes, que corresponden a las variables de parpadeo y temperatura, los marcadores fisiológicos de fatiga mental, que se utilizaron como predictores.

En el caso de las Variables Dependientes, se consideraron las típicamente utilizadas en investigaciones del área (*Lehrer et al., 2010; Borghini et al., 2012; Hockey, 2013*). Por una parte se consideró la Precisión o Accuracy (ACC), según la proporción de respuestas correctas. Esto es cuanto se equivoca el sujeto, asumiendo que a mayor tasa de errores mayor fatiga mental. Cabe consignar que, para la Tarea de Compatibilidad de Flancos, se estableció como medida la Diferencia de Precisión entre Ensayos Incompatibles menos Compatibles (dACC), según las indicaciones de *Green & Bavelier (2003)*, ya que resalta de mejor manera el objetivo de la tarea, que es resiliencia a distractores. Por otra parte se utilizó como variable de rendimiento al Tiempo de Respuesta o Reaction Time (RT), esto es cuanto se demora el sujeto en responder, asumiendo que a mayor fatiga, mayor demora de respuesta. Al igual que para Precisión, en la Tarea de Compatibilidad de Flancos, se utilizó como medida la Diferencia en Tiempo de Latencia para Respuestas Correctas en Ensayos Incompatibles menos Compatibles (dRTc), siguiendo las indicaciones de *Green & Bavelier (2003)*, para destacar la resiliencia frente a distractores (Tabla 1.A).

Tabla 1. Variables para rendimiento atencional y marcadores fisiológicos.

A Variables Dependientes	
Precisión	ACC, dACC
Tiempo de Respuesta	RTGO, dRTc

B Variables Independientes	
Promedio del total del registro	prom, promTempSF
Desviación estándar	std
Promedio por cada minuto del registro	1m, 2m...13m; XmSF
Promedio del último cuartil del registro	ulticuartil
Pendiente de la regresión lineal del registro	pendiente
Intercepto en el eje "y" de la regresión lineal del registro	intercepto
Diferencia entre el promedio del minuto final y el promedio del minuto inicial	Δ Temp, Δ Parp, Δ TempSF
Diferencia entre el promedio del minuto final y el promedio del total del registro	Δ TempProm, Δ ParpProm, Δ TempPromSF
Diferencia entre el promedio del último cuartil y el promedio del total del registro	Δ TempUlticuartil, Δ ParpUlticuartil

A | Construcción de Variables Dependientes. Estas variables reflejan el rendimiento atencional de los sujetos. Incluyen Precisión (según la proporción de respuestas correctas, ACC) y Tiempo de Respuesta (en milisegundos, RTGO). Para la Tarea de Compatibilidad de Flancos, se estableció como medida de Precisión la Diferencia de Precisión entre Ensayos Incompatibles menos Compatibles (dACC), ya que resalta de mejor manera el objetivo de la tarea, que es resiliencia a distractores. De igual forma, en esta tarea se determinó como medida de Tiempo de Respuesta la Diferencia en Tiempo de Latencia para Respuestas Correctas en Ensayos Incompatibles menos Compatibles (dRTc).

B | Construcción de Variables Independientes. Estas variables describen los registros de Duración de Parpadeo y de Temperatura Corporal. Ambos parámetros presentan el mismo tipo de medidas para hacerlas comparables. En el caso de Temperatura Corporal, se describen las variables de Temperatura Periférica registrada a nivel del dedo índice de los sujetos. Además, se incluyen variables de Temperatura Periférica normalizadas por la Temperatura de Borde Central, registrada a nivel de la frente de los sujetos. Estas variables se designan con las siglas SF (Scalp-Finger).

Respecto a las Variables Independientes, los registros fisiológicos a evaluar como marcadores de fatiga, se establecieron diversas variables representativas que pudieran ser comparables entre sí. Para el caso de la conducta ocular, se realizó un análisis de la duración en milisegundos de los parpadeos realizados por el sujeto durante las tareas señaladas. Este aspecto no estuvo incluido en el reporte de Vergara et. al. (2017) y, al tratarse de un parámetro con amplio respaldo bibliográfico como indicador de fatiga, se utilizó como estándar para realizar la comparación entre marcadores. En términos operativos, se analizaron el promedio de duración

de parpadeos en el total de cada una de las tareas y por cada minuto transcurrido en cada ensayo. Además, se analizaron variables derivadas de estos registros tales como desviación estándar, la diferencia entre el minuto final de la tarea respecto al promedio y al minuto inicial, intercepto y pendiente de la regresión lineal del conjunto de parpadeos registrados, entre otros (Tabla 1.B).

Respecto a la variación de temperatura corporal, candidato a evaluar como marcador fisiológico de fatiga mental, el análisis se centró en los promedios de temperatura en grados Celsius a nivel periférico, en este caso medido en la punta del dedo índice (registros Finger o F). Así, se analizó el promedio de temperatura para el tiempo total de duración de cada tarea, el promedio por cada minuto transcurrido en cada ensayo y variables derivadas de los registros basales de temperatura, estableciendo la desviación estándar, la diferencia entre el minuto final de la tarea respecto al promedio y al minuto inicial, intercepto y pendiente de la regresión lineal del conjunto de valores registrados. Como parámetro adicional, se observó la temperatura corporal de borde central, medida en la frente del sujeto (registros Scalp o S), realizándose el mismo análisis que para la temperatura periférica. Considerando esta última aproximación, se determinó la diferencia entre la temperatura de borde central respecto a la temperatura periférica, con el fin de normalizar los registros de temperatura a nivel del dedo (que reflejan vasoconstricción periférica) a través la temperatura de la frente de los sujetos (que no presenta vasoconstricción) (Tabla 1B). De este modo, se resalta el cambio de temperatura periférico producto de vasoconstricción asociada al estado atencional (esta aproximación tampoco formó parte del reporte de Vergara et al., 2017).

Una vez obtenida la base de datos de las variables dependientes e independientes para cada tarea, se procedió a realizar un análisis exploratorio de la importancia predictiva de rendimiento atencional de las distintas variables de temperatura y parpadeo. Para esto, se realizó un análisis estadístico utilizando “R-project” mediante el modelo de “bosques aleatorios de regresión” (“random forest”). Esta técnica de “machine-learning” resulta de gran utilidad para establecer predicciones de variables no categoriales, como es el caso de rendimiento

atencional, ya que permite ajustar un modelo de regresión para cada variable dependiente con cada una de las variables fisiológicas. Esto se ejecuta mediante un sistema de particionamiento recursivo con reemplazo, en el que se calculan distintos subconjuntos de árboles de regresión al azar para predecir el rendimiento atencional. De esta manera, además de evitar el sobreajuste del modelo, se puede examinar con mayor precisión la contribución de cada predictor, sin que su efecto se vea encubierto por otras variables. Así se pudo establecer una clasificación de la importancia de las variables fisiológicas en la predicción del rendimiento atencional.

La elección de esta metodología de clasificación se basa en que cuenta con un amplio respaldo de la literatura para establecer importancias predictivas a modo de tamizaje, que es el objetivo de este estudio (*Basso et al., 2018*). Además, proporciona una interfaz de fácil ejecución, permitiendo el procesamiento automático de ajuste de los parámetros utilizados, previniendo el sobreajuste del modelo y reduciendo la necesidad de vastos conocimientos técnicos por parte del investigador (*Lin et al., 2015*). Si bien se pudo haber optado por otras técnicas de clasificación, tales como “support vector machine” o “redes neuronales”, se consideró pertinente privilegiar “random forest” debido a que no se contaba con un gran número de observaciones, lo que podría incidir sobre la precisión de los otros clasificadores mencionados (*Fernández-Delgado et al., 2014*).

Posteriormente, con las variables fisiológicas de mayor importancia predictiva de rendimiento atencional, se construyeron árboles de inferencia condicional para comprobar esta importancia. Esta metodología permite confirmar las hipótesis generadas por los bosques aleatorios de regresión para la muestra obtenida, a través de un algoritmo de predicción sencillo y comprensivo, a un bajo costo computacional (*Basso et al., 2018*). Esto con la idea de favorecer a futuro el desarrollo e implementación de sistemas de detección eficientes en diversos contextos ocupacionales. Además, se consideró incluir una medida del tamaño de efecto de los resultados obtenidos a través de los árboles de inferencia condicional. En este caso, se utilizó el indicador “d de Cohen” para establecer el tamaño de efecto de la diferencia entre distintos grupos de sujetos, según las desviaciones

estándar que separan las medias de sus registros de rendimiento atencional, asociadas a la predicción de las variables fisiológicas. Este tamaño de efecto pudo ser “pequeño” ($d < 0,5$), “mediano” ($0,5 > d < 0,8$) o “grande” ($d > 0,8$) e indican que tan distintos son estos grupos entre sí (*Nakagawa & Cuthill, 2007*).

Finalmente, se realizaron los mismos análisis estadísticos pero utilizando conjuntamente la parametrización empleada en parpadeos y temperatura. Esto permitió examinar un posible efecto sinérgico en la predicción de rendimiento atencional, así como contrastar directamente cuál de las dos familias de parametrizaciones presenta un mayor valor predictivo.

RESULTADOS

Los resultados de este análisis comprenden la determinación de las variables fisiológicas de mayor importancia predictiva de rendimiento atencional, según los bosques aleatorios de regresión, así como la comprobación de su importancia mediante árboles de inferencia condicional y el tamaño de efecto para las diferencias de rendimiento atencional. A continuación se exponen los resultados más relevantes respecto a los objetivos del estudio, según cada una de las tareas atencionales efectuadas.

Tarea de Rendimiento Continuo (CPT)

Para esta tarea se consideraron los datos de 27 sujetos, debido a problemas técnicos con los registros para los 13 sujetos restantes. Para Precisión (ACC) se establecieron las variables fisiológicas de mayor importancia predictiva según bosques aleatorios de regresión. Para Duración de Parpadeo destacan variables que involucran el promedio de duración del minuto final, así como a la diferencia entre los promedios del minuto final y el inicial y a la diferencia entre el minuto final y el promedio general registrado en la tarea (Figura 2). Para Temperatura Periférica son los promedios del minuto 5 (normalizado por Temperatura de Borde Central) y del minuto 3 las de mayor importancia predictiva. En tanto en el análisis conjunto de Parpadeo y Temperatura, la mayor importancia se centra en la diferencia entre el promedio de duración de parpadeos del minuto final y el promedio global de parpadeos durante toda la tarea ($\Delta\text{ParpProm}$). En este análisis conjunto, aumenta la importancia de variables de Temperatura Periférica tales como la diferencia entre el minuto 10 y el promedio de todo el registro (Figura 3). Para ninguna de las variables fisiológicas de mayor peso predictivo se pudo comprobar su importancia mediante árboles de inferencia condicional.

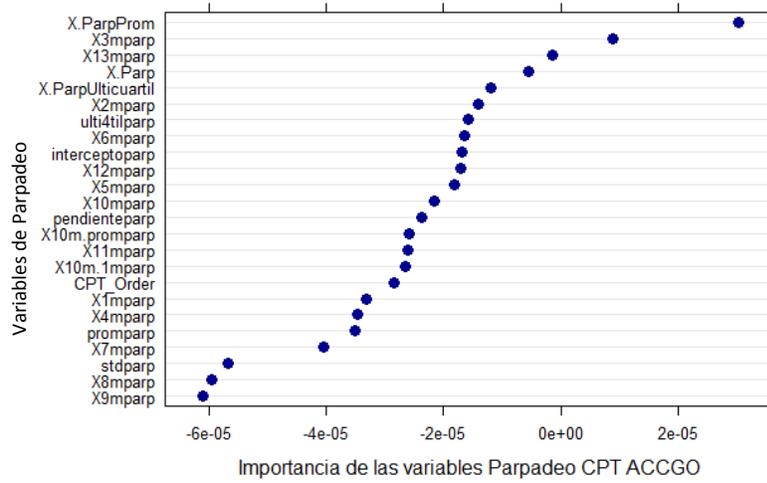


FIGURA 2 | Importancia predictiva de Precisión-CPT de las variables fisiológicas de Duración de Parpadeos. En esta figura se observa la clasificación de las variables de Duración de Parpadeo según su importancia predictiva de la variable Precisión en la tarea CPT. Como variables de mayor peso predictivo destacan Δ ParpProm, Δ Parp y los promedios de duración de parpadeo del minuto 3 (3mparp) y del minuto final (13mparp). La mayoría de las variables con mayor importancia predictiva de Precisión involucran al promedio de duración de parpadeo del minuto final de la tarea CPT.

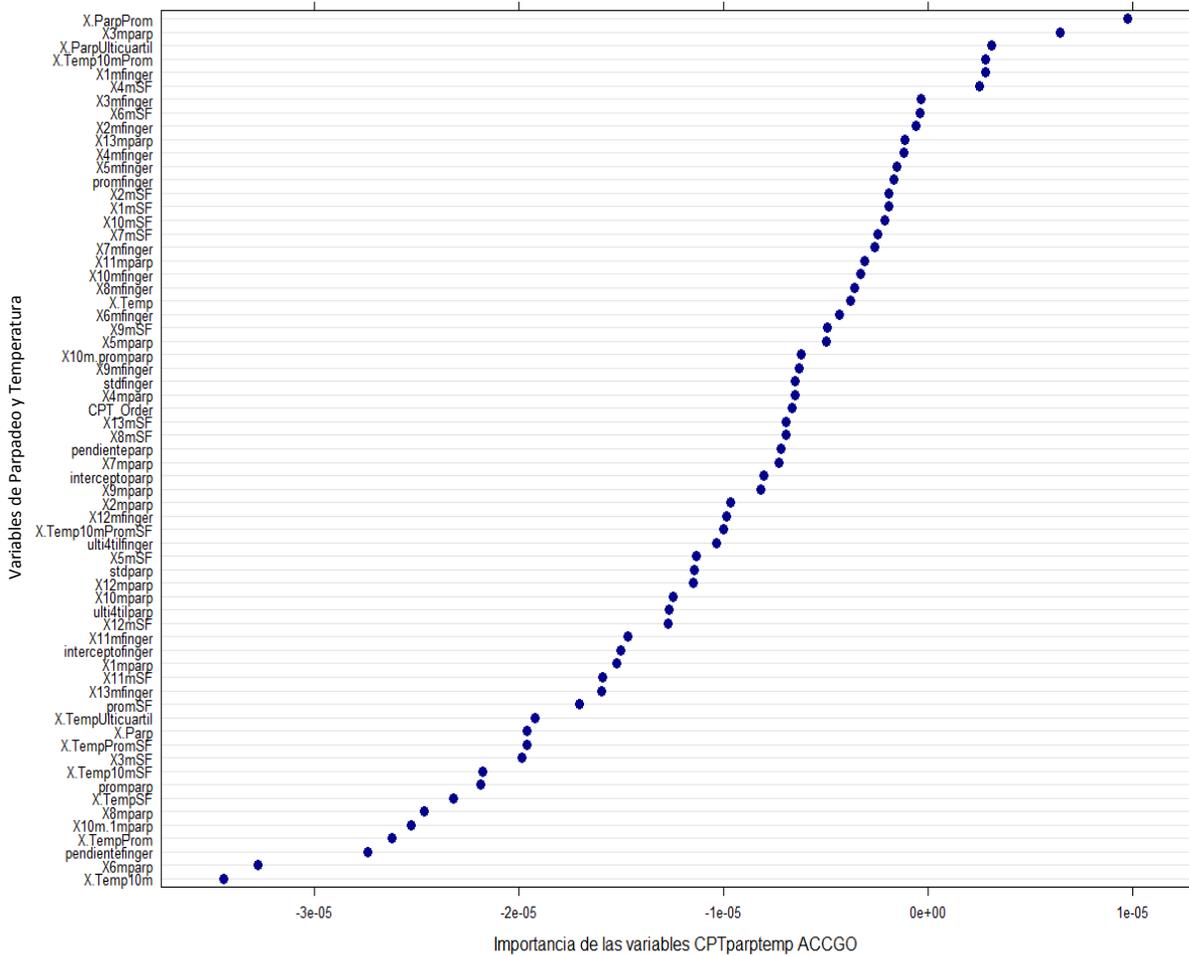


FIGURA 3 | Importancia predictiva de Precisión-CPT de las variables fisiológicas de Duración de Parpadeos y Temperatura Corporal. Al realizar el análisis de bosques aleatorios de regresión en forma conjunta, la variable $\Delta ParpProm$ destaca como la de mayor peso predictivo de Precisión en la tarea CPT. En cuanto a Temperatura, la variable $\Delta Temp10mProm$ adquiere mayor relevancia predictiva en el análisis conjunto.

Respecto a los Tiempos de Respuesta observados (RT), mediante bosques aleatorios de regresión, se pudo determinar nuevamente una importancia predictiva relevante para las variables de Duración de Parpadeo que involucran al promedio del minuto final (Figura 4.A). El análisis según árboles de inferencia condicional para las variables de mayor peso predictivo, sólo permitió comprobar la importancia del promedio de duración de parpadeo del minuto final de la tarea (13mparp) (Figura 4.B). Así, cuando el promedio de duración de parpadeo del minuto final superó los 189.5 milisegundos (ms), se observó una asociación significativa con Tiempos de

Respuesta prolongados, con una mediana de 560 ms para 18 sujetos, a diferencia del grupo compuesto por 9 sujetos que presentaron Tiempos de Respuesta con una mediana de 492 ms ($p = 0.034$). Ambos grupos de sujetos se diferencian en sus medias de Tiempo de Respuesta con un tamaño de efecto “grande” ($d = 1.1$).

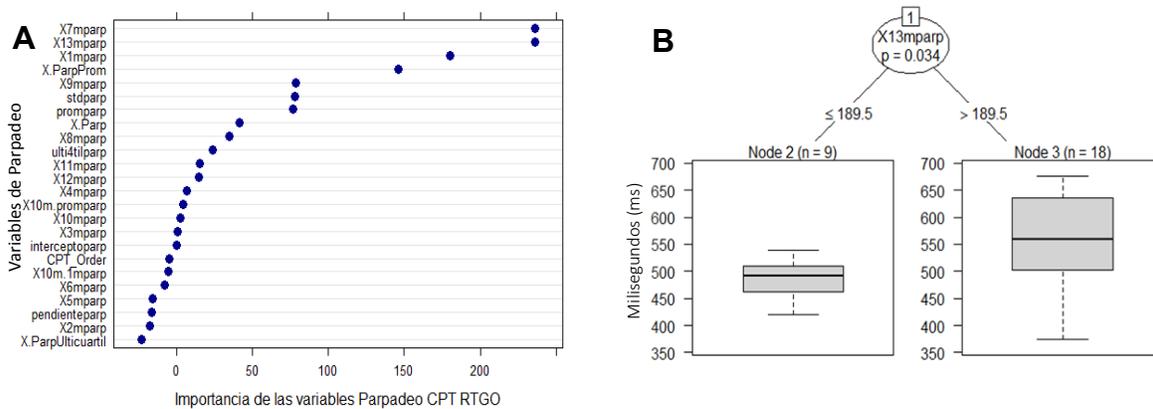


FIGURA 4 | Análisis de variables de Duración de Parpadeos en la predicción de Tiempo de Respuesta-CPT.
A. Clasificación de importancia predictiva para RTGO-CPT de las variables de Duración de Parpadeo según bosques aleatorios de regresión. Entre las variables de mayor peso destacan el promedio del minuto 7 (7mparp), del minuto final de la tarea (13mparp) y la diferencia entre el minuto final y el promedio global del registro (Δ ParpProm). **B.** El análisis de las variables de mayor peso predictivo según árboles de inferencia condicional sólo permite comprobar una importancia estadísticamente significativa para el promedio de duración de parpadeo del minuto final de la tarea. Esta variable permite establecer un punto de corte a los 189.5 ms que distingue a 18 sujetos con Tiempos de Respuesta prolongados (Node 3 en la Figura).

Para el caso de los registros de Temperatura Corporal, el análisis por bosques aleatorios de regresión indica una importancia predictiva muy relevante para las variables que reflejan la variación de temperatura a lo largo de la tarea (Figura 5). Esto tanto para registros de Temperatura Periférica como para Temperatura Periférica normalizada a través de la Temperatura de Borde Central (que resalta el efecto de vasoconstricción asociado a procesos cognitivos).

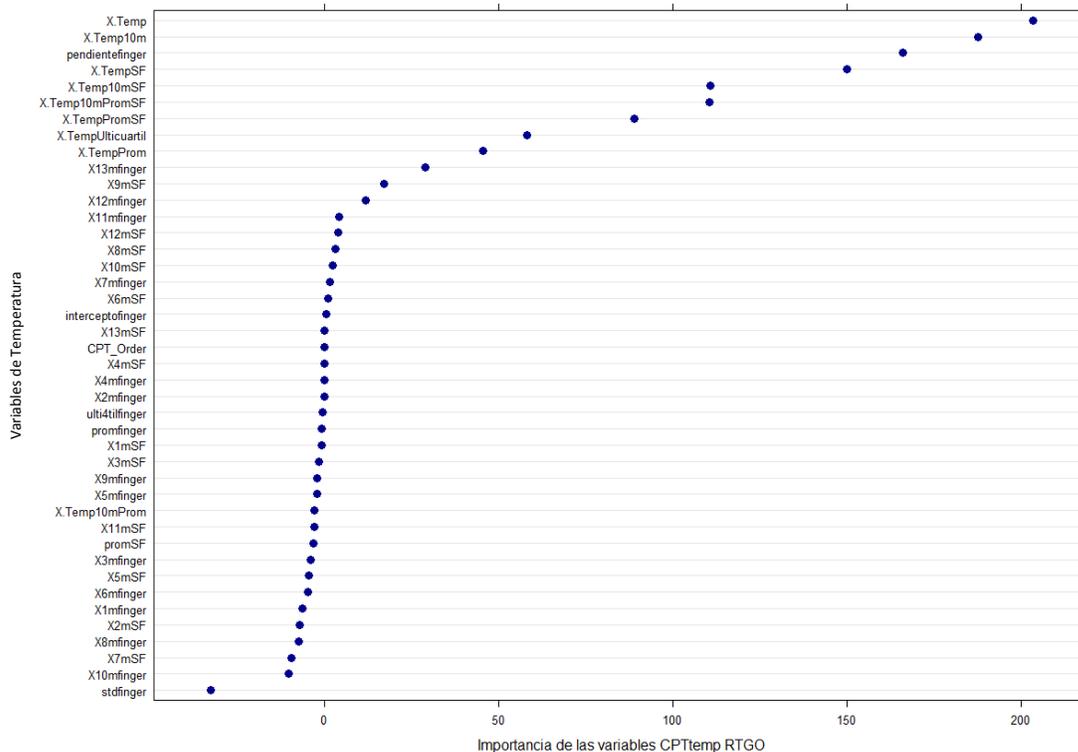


FIGURA 5 | Importancia predictiva de Tiempo de Respuesta-CPT de las variables fisiológicas de Temperatura Corporal. Mediante el uso bosques aleatorios de regresión se determinó la importancia predictiva de las variables de Temperatura Periférica y de Temperatura Periférica normalizada a través de Temperatura de Borde Central (indicadas por las siglas “SF”). En ambos registros, son las variables que reflejan la variación de temperatura a lo largo de la tarea las de mayor peso predictivo: diferencia de Temperatura Periférica entre el minuto final y el inicial (Δ Temp), pendiente de la regresión lineal de la Temperatura Periférica (pendientefinger), diferencia de Temperatura Periférica entre el minuto final y el inicial normalizada por la Temperatura de Borde Central (Δ TempSF).

Al realizar el análisis por árboles de inferencia condicional se comprobó el valor predictivo de Tiempo de Respuesta para diversas variables que reflejan la variación de Temperatura Periférica durante el transcurso de la tarea. Entre estas destacan:

- Diferencia de promedios de Temperatura Periférica entre el minuto final y el inicial (Δ Temp) (Figura 6.A). Si esta diferencia es mayor a -0.431 C° (se acerca a cero) se distingue un grupo de 13 sujetos con Tiempos de Respuesta prolongados (mediana de RTGO de 560 ms) respecto a 14 sujetos con mediana de RTGO de 501 ms ($p\ 0.006$). De otra forma, a menor variación de Temperatura Periférica se observan Tiempos de Respuesta más prolongados. El tamaño de efecto estimado para la diferencia entre estos

grupos se considera “grande” ($d = 1.04$).

- Pendiente de la regresión lineal del registro total de la Temperatura Periférica (pendientefinger) (Figura 6.B). Valores más cercanos a cero de esta variable reflejan una menor variación de Temperatura Periférica a lo largo de la tarea. El análisis por árboles de inferencia condicional indica que valores superiores a -0.083 se asocian a Tiempos de Respuesta prolongados en 19 sujetos (mediana de RTGO de 539 ms), a diferencia de 8 sujetos con mediana de RTGO de 473 ms ($p = 0.006$). La diferencia entre ambos grupos es “grande” según el tamaño de efecto estimado ($d = 1.14$).
- Diferencia de promedios de Temperatura Periférica normalizada por Temperatura de Borde Central entre el minuto final y el inicial (ΔTempSF) (Figura 6.C). Esta variable resalta la variación de Temperatura Periférica atribuible a vasoconstricción. Diferencias menores a 0.675 C° (menor cambio de Temperatura Periférica) detectan a 18 sujetos con Tiempos de Respuesta prolongados (mediana de RTGO de 539 ms), respecto de 9 sujetos con mediana de RTGO de 486 ms ($p = 0.009$). Se estimó una diferencia “grande” entre ambos grupos de sujetos según el tamaño de efecto ($d = 0.93$).

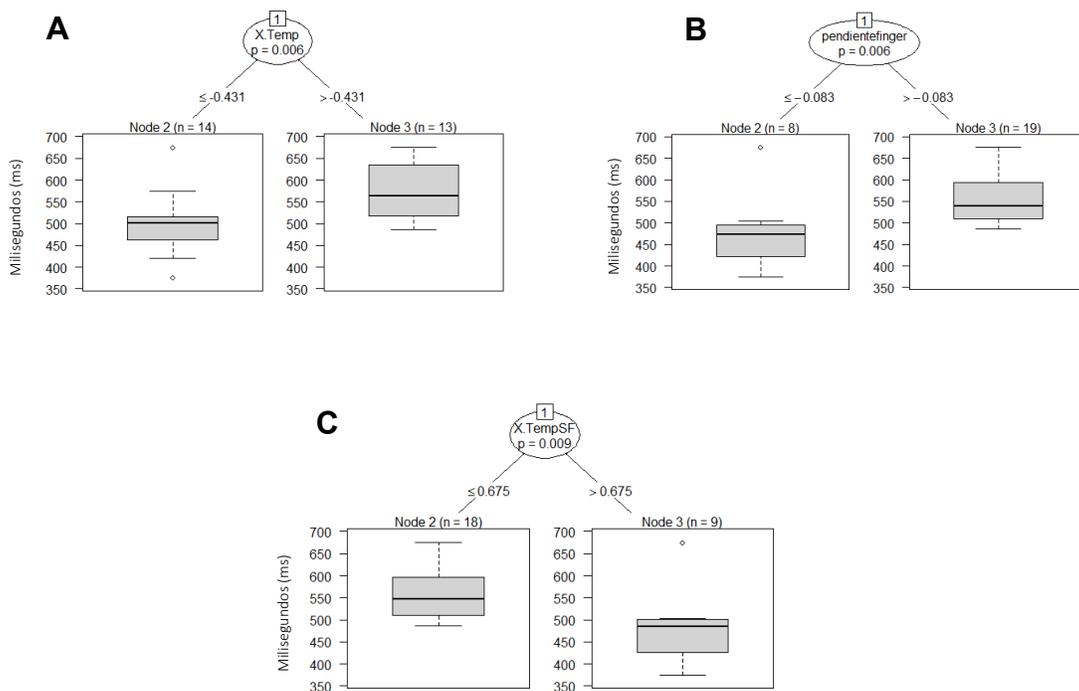


FIGURA 6 | Árboles de inferencia condicional para las variables de Temperatura Corporal de mayor importancia predictiva de Tiempo de Respuesta-CPT. Representación gráfica de la importancia predictiva de las variables que reflejan el cambio de la Temperatura Periférica a lo largo del transcurso de la tarea. En todas se aprecia que a menor variación de Temperatura Periférica se observan mayores Tiempos de Respuesta. **A.** Diferencia de promedios de Temperatura Periférica entre el minuto final y el inicial (Δ Temp). **B.** Pendiente de la regresión lineal del registro total de la Temperatura Periférica (pendientefinger). **C.** Diferencia de promedios de Temperatura Periférica normalizada por Temperatura de Borde Central entre el minuto final y el inicial (Δ TempSF)

En el análisis conjunto de las variables de Duración de Parpadeo y Temperatura Corporal mediante bosques aleatorios de regresión, son las variables que reflejan el cambio de Temperatura Periférica a lo largo de la tarea las de mejor perfil predictivo de Tiempo de Respuesta, no observándose efectos sinérgicos entre ambos marcadores fisiológicos.

Tarea de Compatibilidad de Flancos (FT)

Para esta tarea utilizaron los datos de 32 sujetos, debido a problemas técnicos con los registros para los 8 sujetos restantes. En relación a los objetivos del estudio, se expondrán los resultados para Tiempo de Respuesta (especificado para la tarea FT como la Diferencia en Tiempo de Latencia para Respuestas Correctas en Ensayos Incompatibles menos Compatibles o dRTc, ver Tabla 1) según la dificultad de los ensayos (baja dificultad o Easy y elevada dificultad o Hard).

Respecto a la predicción de Tiempo de Respuesta en los ensayos de baja dificultad (Easy), las variables de Duración de Parpadeo de mayor importancia, según el análisis de bosques aleatorios de regresión, fueron los promedios obtenidos durante el minuto 4 (4mparp) y para el último cuartil de duración de la tarea (ulticuartilparp). Ninguna de estas variables resultó significativa en el análisis por árboles de inferencia condicional.

En el caso de la Temperatura Corporal, las variables de mayor peso predictivo según bosques aleatorios de regresión, correspondieron a la diferencia entre el promedio del minuto final y el promedio de Temperatura Periférica durante toda la tarea ($\Delta\text{TempProm}$) y su variante normalizada por la Temperatura de Borde Central ($\Delta\text{TempPromSF}$) (Figura 7). Ambas reflejan el cambio de Temperatura Periférica durante el transcurso de la tarea FT y ambas pudieron ser comprobadas en su importancia predictiva mediante árboles de inferencia condicional (Figura 8).

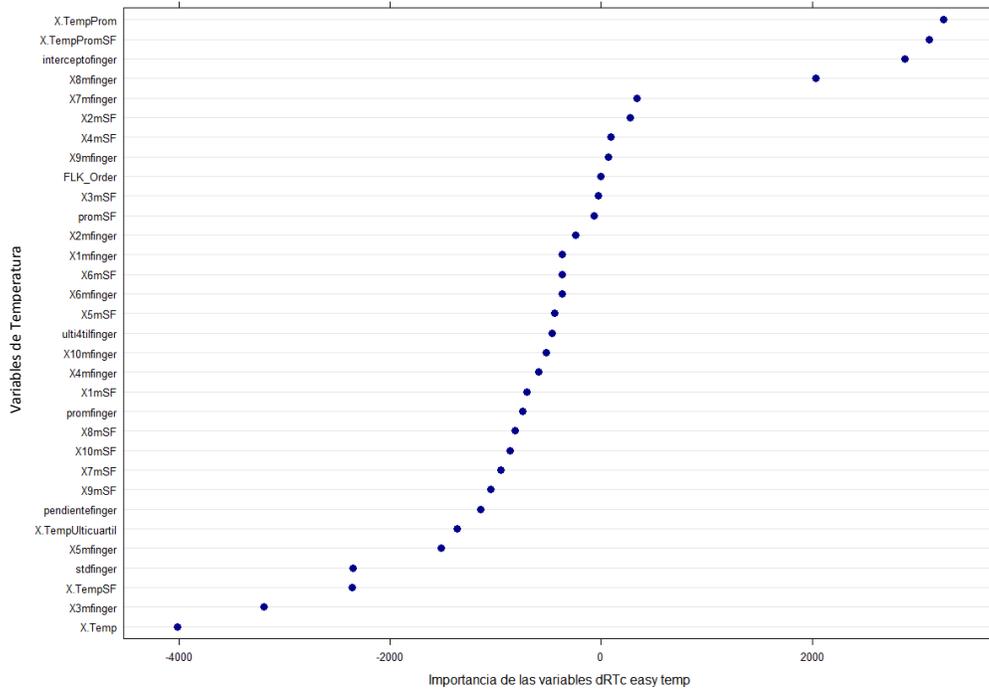


FIGURA 7 | Importancia predictiva de Tiempo de Respuesta-FT de las variables fisiológicas de Temperatura Corporal. Mediante el uso bosques aleatorios de regresión se determinó la importancia predictiva de las variables que reflejan cambios de Temperatura Periférica a lo largo de la tarea FT. Destacan la diferencia entre el promedio del minuto final y el promedio de Temperatura Periférica durante toda la tarea (Δ TempProm), su variante normalizada por la Temperatura de Borde Central (Δ TempPromSF), el intercepto de la regresión lineal de todos los registros de Temperatura Periférica (interceptofinger) y el promedio de Temperatura Periférica del minuto 8.

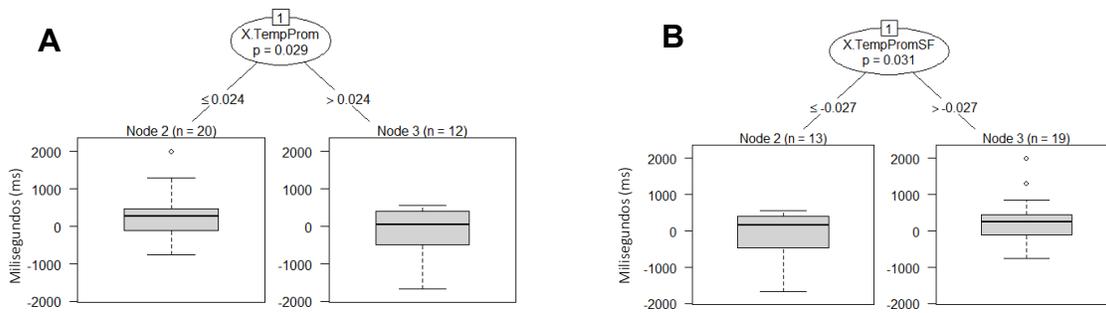


FIGURA 8 | Árboles de inferencia condicional para las variables de Temperatura Corporal de mayor importancia predictiva de Tiempo de Respuesta-FT. Importancia predictiva para Tiempo de Respuesta (Diferencia en Tiempo de Latencia para Respuestas Correctas en Ensayos Incompatibles menos Compatibles o dRTc) de las variables que reflejan el cambio de la Temperatura Periférica a lo largo del transcurso de la tarea. **A.** Diferencia de Temperatura Periférica entre el promedio del minuto final y el promedio global del registro ($\Delta\text{TempProm}$). Cuando esta diferencia es mayor a 0.024 C° , 20 sujetos presentan una mediana de dRTc de 240 ms, distinguiéndose de los 12 sujetos restantes con una mediana de 167 ms de dRTc ($p\ 0.029$). La diferencia entre estos grupos se estimó como “mediana” según el indicador de tamaño de efecto significativo ($d = 0.64$). **B.** Para la misma variable anterior normalizada por la Temperatura de Borde Central ($\Delta\text{TempPromSF}$), se observa que diferencias entre el promedio del minuto final y el promedio global menores o iguales a -0.027 C° , distinguen a 13 sujetos con una mediana de dRTc de 185 ms de los 19 sujetos restantes con una mediana de dRTc de 179 ms ($p\ 0.031$). En este caso, el tamaño de efecto estimado es “pequeño” para diferenciar ambos grupos de sujetos ($d = 0.49$).

El análisis conjunto de todas las variables fisiológicas mediante bosques aleatorios de regresión no demostró cambios relevantes de importancia predictiva, siendo la diferencia entre el promedio del minuto final y el promedio de Temperatura Periférica durante toda la tarea ($\Delta\text{TempProm}$) la de mayor peso predictivo. No se observaron efectos sinérgicos en este análisis entre variables de Duración de Parpadeo y Temperatura Corporal.

Para la predicción de Tiempo de Respuesta de ensayos de elevada dificultad (Hard), el análisis de bosques aleatorios de regresión identifica al promedio de Duración de Parpadeo del minuto inicial (1mparp) y a las variables de Temperatura Periférica promedio de último cuartil (ulticuartiltemp) y promedio de los minutos 4 (4mtemp), 5 (5mtemp) y 6 (6mtemp) como las variables de mayor importancia predictiva. Ninguna de estas observaciones se pudo comprobar a través de árboles de inferencia condicional. Al análisis conjunto de variables de Duración de Parpadeo

y Temperatura Corporal, no se observaron efectos sinérgicos, siendo las variables de Temperatura mencionadas las de mayor peso predictivo.

Tarea de Conteo (CT)

Para esta tarea no fue posible aplicar el análisis realizado para las 2 tareas anteriores. Esto debido a que la duración de parpadeos registrados para todos los sujetos se distribuyó en forma bimodal, con parpadeos de corta y larga duración en todos los ensayos (Figura 9). Esto impidió establecer parámetros comparables con las variables de desempeño (promedio de duración de parpadeos por minuto, desviación estándar, regresión lineal para el registro total de parpadeos, etc.). Dado que el propósito de este estudio consiste en comparar modelos predictivos de rendimiento a través de las variables fisiológicas de parpadeo y temperatura, se decidió no incluir los resultados de esta tarea como parte del análisis.

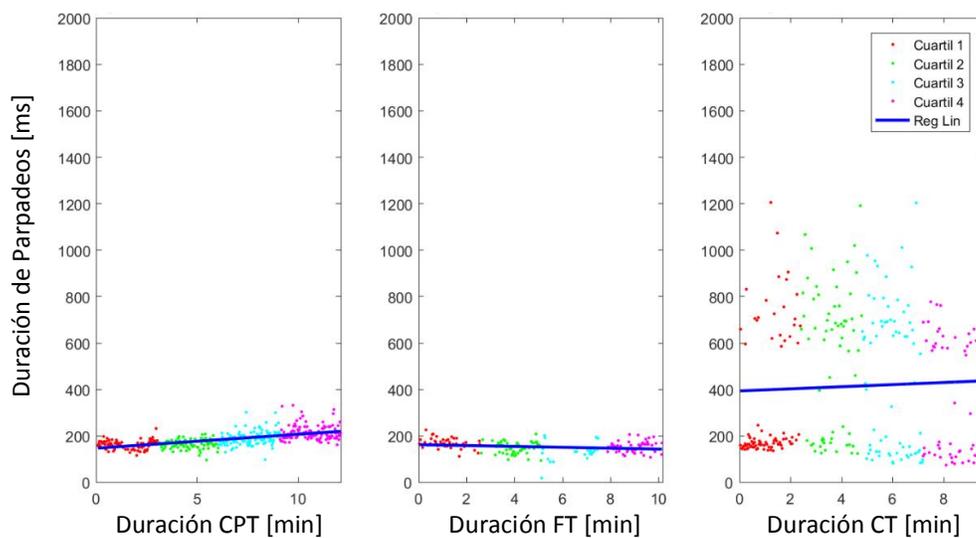


FIGURA 7 | Comparación de distribución de parpadeos según su duración en las 3 tareas atencionales realizadas. La distribución de parpadeos según su duración permitió establecer parámetros comparables entre los registros de las tareas de Atención Sostenida (CPT) y Resiliencia frente a Distractores (FT). Para la tarea de Reclutamiento de Recursos Atencionales se observó una distribución bimodal, en cada minuto de la tarea se registraron parpadeos de corta y muy larga duración. Esto impidió la obtención de promedios o regresiones lineales que reflejen el comportamiento de los parpadeos en relación a fatiga para esta tarea.

DISCUSIÓN

El estudio de la fatiga mental ha sentado diversas bases sobre las cuales se orientan los lineamientos hacia el futuro. Sabemos que se trata de un fenómeno complejo, multideterminado, de alto impacto sobre el desempeño en múltiples tareas, que no se puede prevenir (*Hockey, 2013*). Es por esto que para su abordaje se requiere de una métrica que permita tener un grado de control sobre sus efectos nocivos. En este sentido, el autorreporte de episodios de fatiga mental no resulta confiable, por lo que se ha optado por operacionalizar sus manifestaciones a través de sus consecuencias conductuales, esto es a través de variables de rendimiento como son la precisión del sujeto al ejecutar una tarea y el tiempo de respuesta (*Lehrer et al., 2010; Borghini et al., 2012*). Ambos parámetros dan cuenta del efecto de la fatiga mental durante el transcurso de una tarea prolongada. A mayor tiempo en la tarea se observan una mayor tasa de errores y mayor latencia ejecutiva. Pero lo que interesa no es sólo poder caracterizarla conductualmente, sino poder detectarla a tiempo y evitar sus perjudiciales consecuencias.

Es así, como se han desarrollado sistemas de detección bastante eficientes, que se basan en las variaciones autonómicas que ocurren durante procesos cognitivos (*Borghini, et al., 2012*). El problema surge en el traspaso de estos sistemas a escenarios de vida diaria. Existen dificultades de implementación que limitan el aporte de los sistemas de detección de fatiga mental (*Philip, 2005*). Además, es posible que un solo marcador no sea suficiente para capturar el fenómeno en su totalidad, o que un solo sistema no sea adaptable a los requerimientos de los múltiples contextos de la vida moderna (puede que se requieran distintos marcadores de fatiga en tareas tan disímiles como pilotear una aeronave o realizar una cirugía prolongada) (*Äng et al., 2005; Sequeira et al., 2009*). Es por esto que el foco en sistemas de detección, en los últimos años, está puesto en el desarrollo de marcadores de preferencia sencillos, de bajo costo, mínimamente invasivos y adaptables a distintos contextos (*Luximon & Goonetilleke, 2001*).

En este sentido, estudios recientes realizados en el Laboratorio de Neurosistemas de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile indican una asociación entre la variación térmica corporal y el rendimiento en tareas atencionales (*Vergara et al., 2017*). Esto ocurriría debido al proceso de vasoconstricción periférica al realizar una tarea cognitiva, privilegiando el flujo sanguíneo hacia órganos centrales (*Kreibig, 2010; Romanovsky, 2014*). Esta propuesta resulta muy interesante desde el punto de vista de fatiga mental, dado que contribuiría en la optimización de sistemas de detección en cuanto a una mejor implementación en tareas del mundo real.

Es por esto que en el presente estudio, se propuso evaluar la capacidad predictiva de rendimiento atencional, medida operativa de fatiga mental, de la variación de temperatura corporal periférica, comparada con un marcador fisiológico ya reconocido por la literatura especializada como es la prolongación de la duración de parpadeos (*Stern et al., 1994; Caffier et al., 2003*). Para esto, se analizaron los registros de conducta ocular y medición de temperatura durante la ejecución de distintas tareas atencionales, obtenidos en la investigación de *Vergara et al. (2017)*. A partir de esta base de datos, se realizó un análisis exploratorio de la importancia predictiva de las variables fisiológicas para rendimiento atencional, mediante la técnica de “machine learning” bosques aleatorios de regresión. En un segundo tiempo, con las variables de mayor peso predictivo, se comprobó su importancia para esta base de datos construida mediante árboles de inferencia condicional.

Los resultados obtenidos respaldan al registro de la variación de temperatura corporal periférica como marcador fisiológico de fatiga mental. Bajo el marco teórico propuesto, la variación térmica periférica refleja el proceso de vasoconstricción asociado a la redistribución del flujo sanguíneo al momento de ejecutar una tarea con demanda cognitiva, en este caso tareas atencionales (*Romanovsky, 2014*). Este supuesto pudo ser corroborado mediante el análisis de bosques aleatorios de regresión. Tanto en la tarea de atención sostenida (CPT) como en la tarea de resiliencia frente a distractores (FT), las variables de temperatura corporal de mayor importancia predictiva correspondieron a las que representan el cambio de

temperatura periférica durante el transcurso de la tarea, esto para mediciones exclusivas de dedo índice como para sus variantes normalizadas a través de la temperatura de borde central (ver Figuras 5 y 7). Esto quiere decir que a una menor variación de temperatura periférica a lo largo de la tarea (lo que refleja una menor vasoconstricción periférica) se observan tiempos de respuesta prolongados, por ende un menor rendimiento atencional, lo que es atribuible al impacto de la fatiga mental al ejecutar tareas atencionales. Estas observaciones pudieron ser comprobadas a través del análisis por árboles de inferencia condicional, estimándose un tamaño de efecto “grande” para distinguir grupos de sujetos con tiempos de respuesta diferenciales. Esto resulta muy interesante si se considera el problema de la implementación de marcadores de fatiga mental mencionado previamente (*Luximon & Goonetilleke, 2001*), ya que una medición de aplicación sencilla, de bajo costo y mínimamente invasiva, como lo es el registro de temperatura periférica, podría considerarse como una alternativa de especial relevancia en el desarrollo de sistemas de detección de fatiga mental.

Al realizar la comparación con la prolongación de duración de parpadeos, los resultados indican similitudes y divergencias. En la tarea de atención sostenida, se observó que en ambos marcadores las variables que dan cuenta del cambio de los parámetros durante el transcurso de la tarea, o sea los definidos por la diferencia entre el inicio y el final de la tarea, se asocian a tiempos de respuesta diferenciales. Esto se obtuvo a través del análisis de importancia predictiva realizado a través de bosques aleatorios de regresión (ver Figuras 4A y 5). Esto se pudo comprobar para diversas variables de temperatura y para el promedio de duración de parpadeo del minuto final mediante árboles de inferencia condicional, con un tamaño de efecto “grande” entre grupos de sujetos con medias de tiempo de respuesta distintas (Figura 6). De este modo, estos resultados sugieren una tendencia para ambos parámetros, a mayor tiempo en la tarea, tanto la prolongación progresiva de la duración de parpadeos como la menor variación de temperatura periférica, tienen importancia en la predicción de menoscabo en el rendimiento atencional, medido a través de tiempos de respuesta prolongados, lo que indica una capacidad de detección de fatiga mental.

En cuanto a la predicción de precisión en esta misma tarea, a través de bosques aleatorios de regresión sólo se observó una mayor importancia entre las variables de parpadeo que reflejan el cambio entre el inicio y el final de la tarea y el rendimiento atencional (Figura 2), no así para temperatura. Esta importancia no pudo ser comprobada mediante árboles de inferencia condicional, para la base de datos construida.

Distinto es el caso al evaluar la capacidad de resiliencia frente a distractores. En este ámbito, es la variación de temperatura corporal la que exhibe una importancia predictiva relevante y comprobada para la base de datos respecto a tiempos de respuesta (Figuras 7 y 8). Ambas metodologías sugieren que la diferencia de temperatura entre el minuto final y el registro global de la tarea (en su versión fácil), tanto al medirse exclusivamente a nivel periférico como al normalizar la medición con la temperatura de borde central, predice tiempos de respuesta prolongados en aquellos sujetos con menor variación térmica periférica. El tamaño de efecto para las diferencias entre grupos de sujetos según tiempo de respuesta se estimó como “mediano” para los registros de temperatura periférica exclusiva (no normalizados). Lo anterior indica que para este tipo de tarea en particular, es el cambio de temperatura periférico el parámetro mejor perfilado como marcador de rendimiento atencional, por ende mejor marcador de fatiga mental.

Al realizar el análisis conjunto de las variables de temperatura y parpadeo no se observaron efectos sinérgicos relevantes sobre la importancia predictiva de rendimiento atencional, en ninguna de las tareas evaluadas. Esto no formaba parte de los resultados esperados al inicio del estudio, ya que diversos autores sugieren que el uso conjunto de marcadores amplía el rango de detección de fatiga mental (*Äng et al., 2005; Sequeira et al., 2009*). Frente a lo observado, se plantean 2 posibles explicaciones. Por una parte, puede que se requiera un mayor tamaño muestral que permita dar cuenta de este efecto esperado o, por otra parte, ambos marcadores pudieran capturar características diferenciales del mismo fenómeno, por lo que no se configura un efecto potenciador entre ambos.

Finalmente, dado que los resultados de este estudio apoyan la validación de la variación de temperatura corporal periférica como marcador de rendimiento atencional, se propone explorar su potencial como marcador de fatiga mental en futuras investigaciones afines. En este sentido, a partir de la identificación de variables térmicas con importancia predictiva a través de bosques aleatorios de regresión, se considera interesante establecer modelos predictivos con un mayor tamaño muestral. A la vez, resulta de interés determinar “puntos de corte” de variación de temperatura periférica que permitan establecer sistemas de alarma de fatiga mental, que pudieran ponerse a prueba en ambientes más ecológicos tales como tareas de simulación de aeronaves, control de tránsito aéreo o tareas de conducción vehicular. Por último, en un terreno más amplio, se plantea una posible caracterización de sujetos que pudieran ser más propensos a fatiga según su variabilidad térmica periférica.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos respaldan al registro de la variación de la temperatura corporal periférica como marcador fisiológico de fatiga mental. Esto basado en el análisis de bosques aleatorios de regresión, que resalta su importancia predictiva respecto a los tiempos de respuesta de las tareas atencionales, que además pudo corroborarse a través de árboles de inferencia condicional.
- Esto refuerza el marco teórico propuesto, en donde el cambio de temperatura corporal periférico puede reflejar el proceso de vasoconstricción asociado a la redistribución del flujo sanguíneo al ejecutar una tarea atencional.
- El registro exclusivo de temperatura a nivel del dedo (temperatura periférica) es suficiente para predecir tiempos de respuesta prolongados, lo que favorece la aplicabilidad de este marcador en escenarios más ecológicos como por ejemplo cabinas de aeronaves o control de tránsito aéreo.
- Respecto a las variables de parpadeo, a través del uso de bosques aleatorios de regresión se corrobora su importancia como marcador de fatiga mental, en cuanto a la predicción de menor precisión y tiempos de respuesta prolongados en la tarea de atención sostenida. En este sentido el cambio térmico periférico presenta un mejor perfil como marcador de fatiga mental en tareas de resiliencia frente a distractores.

- No se observan efectos sinérgicos al usar ambos marcadores fisiológicos en conjunto. Es posible que se requieran estudios con un mayor número de sujetos para tener mayor certeza de que efectivamente así sea.
- A partir de las importancias predictivas definidas por bosques aleatorios de regresión se proponen estudios afines que exploren el potencial del cambio térmico periférico como marcador de fatiga mental, como es establecer modelos predictivos con un mayor tamaño muestral, determinar “puntos de corte” que permitan establecer sistemas de alarma de fatiga mental, analizar su rol en ambientes más ecológicos tales como tareas de simulación de aeronaves, control de tráfico aéreo o tareas de conducción vehicular y una posible caracterización de sujetos que pudieran ser más propensos a fatiga según su variabilidad térmica periférica.

REFERENCIAS

1. Albert DA, Ouimet MC, Jarret J, Cloutier MS, Paquette M, Badeau N, Brown TG (2017) Linking mind wandering tendency to risky driving in young male drivers. *Accident; analysis and prevention* 111: 125-132.
2. Äng B, Linder J, Harms-Ringdahl K (2005) Neck strength and myoelectric fatigue in fighter and helicopter pilots with a history of neck pain. *Aviation, space, and environmental medicine* 76(4): 375-380.
3. Basso F, Basso LJ, Bravo F, Pezoa R (2018) Real-time crash prediction in an urban expressway using disaggregated data. *Transportation research part C: emerging technologies* 86: 202-219.
4. Berntson GG, Thomas Bigger J, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Der Molen MW (1997) Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology* 34(6): 623-648.
5. Besson P, Bourdin C, Bringoux L, Dousset E, Maïano C, Marqueste T, Vercher JL (2013) Effectiveness of physiological and psychological features to estimate helicopter pilots' workload: A Bayesian network approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14(4): 1872-1881.
6. Boksem MA, Meijman TF, Lorist MM (2005) Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Cognitive brain research* 25(1): 107-116.
7. Boksem MA, Tops M (2008) Mental fatigue: costs and benefits. *Brain research reviews* 59(1): 125-139.
8. Borghini G, Astolfi L, Vecchiato G, Mattia D, Babiloni F (2014) Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 44: 58-75.
9. Butcher JN (1994) Psychological assessment of airline pilot applicants with the MMPI-2. *Journal of Personality Assessment* 62(1): 31-44.

10. Caffier PP, Erdmann U, Ullsperger P (2003) Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure. *European journal of applied physiology* 89(3-4): 319-325.
11. Cannon WB (1929) Bodily changes in pain, hunger, fear and rage: An account of recent research into the function of emotional excitement. *Psychological Trauma: Theory, Research, Practice, and Policy* 1(1): 3-23.
12. Charkoudian N (2003) Skin blood flow in adult human thermoregulation: How it works, when it does not, and why. *Mayo Clinic Proceedings* 78(5): 603-612.
13. Di Milia L, Smolensky MH, Costa G, Howarth HD, Ohayon MM, Philip P (2011) Demographic factors, fatigue, and driving accidents: An examination of the published literature. *Accident Analysis & Prevention* 43(2): 516-532.
14. Di Stasi LL, McCamy MB, Catena A, Macknik SL, Canas JJ, Martinez-Conde S (2013) Microsaccade and drift dynamics reflect mental fatigue. *European Journal of Neuroscience* 38(3): 2389-2398.
15. Dismukes RK (2017) *Human error in aviation*. Routledge.
16. Driskell JE, Salas E (1991) Group decision making under stress. *Journal of Applied Psychology* 76(3): 473.
17. Fernández-Delgado M, Cernadas E, Barro S, Amorim D (2014) Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *The Journal of Machine Learning Research* 15(1): 3133-3181.
18. Gaetan S, Dousset E, Marqueste T, Bringoux L, Bourdin C, Vercher JL, Besson P (2015) Cognitive workload and psychophysiological parameters during multitask activity in helicopter pilots. *Aerospace medicine and human performance* 86(12): 1052-1057.
19. Green CS, Bavelier D (2003) Action video game modifies visual selective attention. *Nature* 423(6939): 534-537.
20. Griffith JW, Kerr WA, Mayo Jr. TB, Topal JR (1950) Changes in subjective fatigue and readiness for work during the eight-hour shift. *Journal of Applied Psychology* 34(3): 163.

21. Haga S, Shinoda H, Kokubun M (2002) Effects of task difficulty and time-on-task on mental workload. *Japanese Psychological Research* 44(3): 134-143.
22. Hart SG, Staveland LE (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology* 52: 139-183.
23. Hertzman AB, Roth LW (1942) The absence of vasoconstrictor reflexes in the forehead circulation. Effects of cold. *American Journal of Physiology* 136(4): 692-697.
24. Hirvonen K, Puttonen S, Gould K, Korpela J, Koefoed VF, Müller K (2010) Improving the saccade peak velocity measurement for detecting fatigue. *Journal of neuroscience methods* 187(2): 199-206.
25. Hockey R (2013) *The psychology of fatigue: work, effort and control*. Cambridge University Press.
26. Hopstaken JF, van der Linden D, Bakker AB, Kompier MA (2015) A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement. *Psychophysiology* 52(3): 305-315.
27. Hopstaken JF, van der Linden D, Bakker AB, Kompier MA, Leung YK (2016) Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 42(6): 878.
28. Iampietro PF (1971) Use of skin temperature to predict tolerance to thermal environments. Civil Aeromedical Inst. Oklahoma City, OKLA.
29. International Civil Aviation Organization (2017) *Fatigue Management*. Recuperado de <http://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/>
30. Inzlicht M, Schmeichel BJ, Macrae CN (2014) Why self-control seems (but may not be) limited. *Trends in cognitive sciences* 18(3): 127-133.
31. Jansen AS, Van Nguyen X, Karpitskiy V, Mettenleiter TC, Loewy AD (1995) Central command neurons of the sympathetic nervous system: basis of the fight-or-flight response. *Science* 270(5236): 644.

32. Kreibig SD (2010) Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological psychology* 84(3): 394-421.
33. Lehrer P, Karavidas M, Lu SE, Vaschillo E, Vaschillo B, Cheng A (2010) Cardiac data increase association between self-report and both expert ratings of task load and task performance in flight simulator tasks: An exploratory study. *International Journal of Psychophysiology* 76(2): 80-87.
34. Lin L, Wang Q, Sadek AW (2015) A novel variable selection method based on frequent pattern tree for real-time traffic accident risk prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 55: 444-459.
35. Luckiesh MW, Moss FK (1937). *The science of seeing*.
36. Luckiesh MW (1947) Reading and the rate of blinking. *Journal of experimental psychology* 37(3): 266.
37. Luximon A, Goonetilleke RS (2001) Simplified subjective workload assessment technique. *Ergonomics* 44(3): 229-243.
38. Mansikka H, Simola P, Virtanen K, Harris D, Oksama L (2016) Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches. *Ergonomics* 59(10): 1344-1352.
39. Möckel T, Beste C, Wascher E (2015) The effects of time on task in response selection-an erp study of mental fatigue. *Scientific reports* 5: 10113.
40. Morris TL, Miller JC (1996) Electrooculographic and performance indices of fatigue during simulated flight. *Biological psychology* 42(3): 343-360.
41. Nakagawa S, Cuthill IC (2007) Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists. *Biological reviews* 82(4): 591-605.
42. Noy YI, Horrey WJ, Popkin SM, Folkard S, Howarth HD, Courtney TK (2011) Future directions in fatigue and safety research. *Accident Analysis & Prevention* 43(2): 495-497.
43. Pfaff U, Fruhstorfer H, Peter JH (1976) Changes in eye-blink duration and frequency during car driving. *European Journal of Physiology* 362: R21.

44. Philip P (2005) Sleepiness of occupational drivers. *Industrial health* 43(1): 30-33.
45. Riccio CA, Reynolds CR, Lowe P, Moore JJ (2002) The continuous performance test: a window on the neural substrates for attention?. *Archives of clinical neuropsychology* 17(3): 235-272.
46. Romanovsky AA (2014) Skin temperature: its role in thermoregulation. *Acta physiologica* 210(3): 498-507.
47. Rowe DW, Sibert J, Irwin D (1998) Heart rate variability: Indicator of user state as an aid to human-computer interaction. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* 480-487.
48. Schellekens JM, Sijtsma GJ, Vegter E, Meijman TF (2000) Immediate and delayed after-effects of long lasting mentally demanding work. *Biological Psychology* 53(1): 37-56.
49. Schilder JD, IJzerman H, Denissen JJ (2014) Physical warmth and perceptual focus: A replication of IJzerman and Semin (2009). *PloS one* 9(11): e112772.
50. Sequeira H, Hot P, Silvert L, Delplanque S (2009) Electrical autonomic correlates of emotion. *International journal of psychophysiology* 71(1): 50-56.
51. Singh IL, Sharma HO, Singh AL (2005) Effect of training on workload in flight simulation task performance. *Journal of the Indian Academy of applied Psychology* 31(1-2): 81-90.
52. Stern JA, Boyer D, Schroeder D (1994) Blink rate: a possible measure of fatigue. *Human factors* 36(2): 285-297.
53. Thomson DR, Besner D, Smilek D (2015) A resource-control account of sustained attention: evidence from mind-wandering and vigilance paradigms. *Perspectives on Psychological Science* 10(1): 82-96.
54. van der Linden D (2011) The urge to stop: The cognitive and biological nature of acute mental fatigue. *Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications* 149-164.

55. Vergara RC, Moënné-Loccoz C, Maldonado PE (2017) Cold-blooded attention: finger temperature predicts attentional performance. *Frontiers in human neuroscience* 11: 454.
56. Wanyan X, Zhuang D, Wei H, Song J (2011) Pilot attention allocation model based on fuzzy theory. *Computers & Mathematics with Applications* 62(7): 2727-2735.
57. Wanyan X, Zhuang D, Zhang H (2014) Improving pilot mental workload evaluation with combined measures. *Bio-medical materials and engineering* 24(6): 2283-2290.
58. Zhang G, Yau KK, Zhang X, Li Y (2016) Traffic accidents involving fatigue driving and their extent of casualties. *Accident Analysis & Prevention* 87: 34-42.