

# **Análisis del sueño y la fatiga en entornos operacionales de las Fuerzas Armadas**

Agustín Folgueira<sup>1</sup>, Malena Mul Fedele<sup>2</sup>, Facundo Etchehún<sup>3</sup>, Camila Tortello<sup>2</sup>, Santiago Plano<sup>2</sup>, Guido Simonelli<sup>4</sup>, Daniel E. Vigo<sup>2\*</sup>

1. Programa de Neurodefensa, Coordinación de Salud y Bienestar, Ministerio de Defensa.
2. Instituto de Investigaciones Biomédicas BIOMED (UCA – CONICET).
3. Escuela Militar de Montaña «Tte. Grl. Juan Domingo Perón», Ejército Argentino.
4. Departamento de Medicina, Universidad de Montreal.

## **\* Correspondencia**

Instituto de Investigaciones Biomédicas BIOMED (UCA-CONICET)

Alicia Moreau de Justo 1600, 4° piso.

C1107AFF Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

[danielvigo@uca.edu.ar](mailto:danielvigo@uca.edu.ar)

## **Abstract**

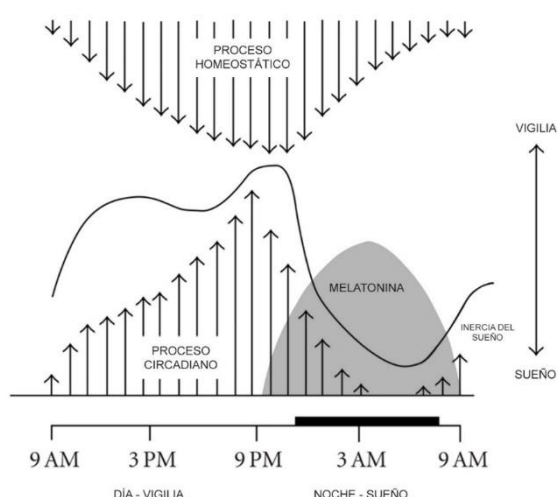
Los modelos biomatemáticos de fatiga (MBMF) predicen el riesgo de fatiga en función del historial de sueño y hora del día, aunque existen pocos estudios sobre su aplicación en entornos operacionales reales. En un primer estudio, se analizó el impacto de la noche polar y aislamiento extremo en el sueño y estado de alerta en la base antártica Belgrano II. Los sujetos durmieron en promedio una hora menos durante el invierno, junto con un aumento del sueño diurno. No se observaron deterioros en el rendimiento, y la estacionalidad moduló la correlación entre inicio de sueño y tiempo de reacción. En un segundo estudio, se evaluó la adecuación del MBMF en tropas de operaciones especiales. Los parámetros reportados en estudios previos generaban predicciones inadecuadas para el entorno en el que se aplicaron. En contraste, la optimización de los parámetros a pruebas de alerta realizadas en el terreno permitió obtener predicciones más precisas. En conjunto, los resultados preliminares obtenidos facilitarán el desarrollo de estrategias personalizadas para la gestión de la fatiga y rendimiento en estos contextos.

**Palabras clave:** sueño, modelado biomatemático de la fatiga, rendimiento, entornos operacionales

## INTRODUCCIÓN

El sueño es fundamental para mantener el éxito físico y mental en operaciones militares. Incluso los miembros del servicio mejor equipados y motivados sufren los efectos de la pérdida de sueño. Típicamente, el personal militar puede considerarse operativamente ineficaz después de 48 horas continuas sin dormir. Los factores de estrés operacionales como la carga de trabajo, el clima, la altitud, el aislamiento o las latitudes extremas pueden actuar como un factor adicional que modifica el sueño y, consecuentemente, aumenta el riesgo de padecer fatiga. Así, comprender la capacidad de los miembros del servicio para operar con poco o nada de sueño es vital para la seguridad operacional. Por otro lado, las operaciones militares pueden ser continuas y durar las 24 horas al día, además de estar influenciadas por eventos y requisitos aleatorios e impredecibles. El trabajo por turnos es inevitable para gran parte del personal militar desplegado en entornos operacionales, haciendo que las oportunidades de dormir puedan estar alteradas y contribuyendo a la pérdida del sueño, desincronización de los ritmos circadianos y a la disminución del rendimiento durante la vigilia. Esto se asocia con menor rendimiento físico y mental, e incrementa el riesgo de cometer errores por bajo rendimiento.<sup>1</sup>

En el ámbito de la gestión del riesgo de fatiga, los modelos biomatemáticos de fatiga (MBMF) son conjuntos de ecuaciones que permiten predecir de manera cuantitativa una métrica de riesgo de fatiga, basándose en factores como el historial de sueño y la hora del día. La fortaleza de estos modelos radica en su capacidad para integrar la investigación científica con observaciones empíricas, con el fin de predecir el nivel de fatiga de una persona a lo largo de su jornada, según sus periodos de servicio. Estos modelos consideran que el estado de alerta varía a lo largo de la vigilia en función de las horas de sueño previas, la hora del día en que se durmió, el tiempo que la persona lleva despierta y el momento del día en que realiza sus actividades, teniendo en cuenta los determinantes del ciclo – sueño vigilia (Figura 1). De esta manera, los MBMF no solo permiten predecir el estado de alerta del personal asignado a una tarea, sino también facilitar una programación racional de las actividades.<sup>2</sup>



**Figura 1. Determinantes del ciclo sueño – vigilia.** La interacción entre el proceso circadiano (determinado por los núcleos supraquiasmáticos del hipotálamo) y el proceso homeostático (determinado por la acumulación de adenosina en el prosencéfalo basal) dan como resultado un episodio de sueño nocturno de 8 h y un período de vigilia de 16 h durante el día. El proceso homeostático propicia un aumento de la propensión al sueño a lo largo del período de vigilia y alcanza un pico antes de la hora de acostarse. El proceso circadiano, contrapuesto al anterior, propicia un aumento del estado de alerta y alcanza un pico también al final de la vigilia (con un decaimiento a primeras horas de la tarde). Con la puesta del sol y el aumento de la secreción de melatonina, la actividad de los núcleos supraquiasmáticos decae, disminuyendo el estado de alerta y determinando la predominancia del proceso homeostático.

Existen pocos estudios que documenten la aplicación del modelado biomatemático de la fatiga en entornos operacionales reales. En este contexto, se presentarán los resultados del trabajo realizado por nuestro grupo

en dos entornos operacionales diferentes. En primer lugar, se expondrán resultados descriptivos sobre el impacto de la noche polar y el aislamiento extremo en el sueño y la fatiga, como una primera aproximación a la futura aplicación de modelos matemáticos de fatiga. En segundo lugar, se mostrarán resultados relacionados con la optimización de dichos modelos durante el entrenamiento de tropas especiales en la Escuela Militar de Montaña «Tte. Grl. Juan Domingo Perón».

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### **Estudio 1: Impacto de la noche polar y el aislamiento extremo en el sueño y la fatiga en operaciones antárticas.**

**Diseño.** Se trata de un diseño analítico, observacional, longitudinal, y de alcance exploratorio. La base Belgrano II está constituida por una serie de instalaciones científicas ubicadas a nivel del mar (77° 51'S y 34° 33'O), a aproximadamente 1.300 km del Polo Sur. La tripulación de la estación generalmente consiste en alrededor de 20 personas. Debido a su ubicación geográfica, Belgrano II tiene alrededor de cuatro meses (desde el 22 de octubre hasta el 18 de febrero) de día (día polar: al menos parte del disco solar es visible durante 24 horas); cuatro meses (del 19 de febrero al 23 de abril y del 19 de agosto al 21 de octubre) con longitudes variables de día y noche; y cuatro meses (del 24 de abril al 18 de agosto) de noche (noche polar: ninguna parte del disco solar es visible durante 24 horas) (las fechas corresponden al año 2014). La temperatura varía entre 5 °C en verano y -43 °C en invierno, con ráfagas de viento superiores a los 200 km/h. Para generar un ciclo de luz-oscuridad durante el verano, se utilizan ventanas con persianas cerradas durante la "noche", ajustándose a una rutina de sueño normal y utilizando antifaces si es necesario. Durante el invierno, el ciclo luz-oscuridad depende completamente de la iluminación artificial (alrededor de 300 lx). Las mediciones se realizaron cada dos meses, de marzo a noviembre. La duración del período de luz solar natural (luz diurna + crepúsculo civil) el día 15 de cada mes fue: marzo, 17:32 hrs; mayo, 00:00 hrs; julio, 00:00 hrs; septiembre, 14:01 hrs; y noviembre, 24:00 hrs.<sup>3</sup>

**Muestra.** Los resultados presentados en este trabajo se corresponden a 13 militares de sexo masculino que invernaron en la campaña del año 2014.

**Actigrafía y registros de sueño.** El sueño fue evaluado mediante acelerómetros de muñeca (MicroMini Motionloggers Actigraphs, Ambulatory Monitoring Inc., Ardsley, NY). Además, los participantes completaron un registro de sueño con información sobre su período principal de sueño y siestas. Los siguientes índices fueron reportados: número de noches registradas, inicio del sueño (hora de inicio del primer episodio de sueño después de acostarse, según lo registrado por la actigrafía), final del sueño (hora de finalización del último episodio de sueño antes de despertarse, según lo registrado por la actigrafía), duración del sueño (tiempo transcurrido entre el inicio y el final), eficiencia del sueño (proporción expresada en % del tiempo total dedicado a dormir en comparación con el tiempo total pasado en la cama). Los valores del inicio del sueño se linearizaron antes de realizar los análisis estadísticos. Para los episodios de sueño diurno, se calculó el número promedio de episodios de sueño observados durante el periodo de medición y la duración promedio del sueño diurno,

promediando por la duración del periodo de medición, lo que incluye días con y sin sueño diurno. Por otro lado, el inicio promedio de las siestas, su final, duración y eficiencia se calcularon promediando por el número de episodios de siestas, para aquellos participantes que tomaron al menos una siesta en cada periodo de medición.

**Test de vigilancia psicomotora.** Utilizamos una versión adaptada en netbook del Test de Reacción Psicomotora (PVT) de cinco minutos del Instituto Walter Reed (EEUU) para evaluar el tiempo de reacción como una medida indirecta del estado de alerta. El PVT se administró por la mañana temprano después del desayuno y por la tarde antes de la cena, en un día para cada uno de los puntos de medición. Se analizaron cinco índices diferentes: el tiempo medio de respuesta para todas las pruebas (MRT); la desviación estándar de los tiempos de respuesta para todas las pruebas (SRT); el 10% más rápido de los tiempos de respuesta para todas las pruebas, o dominio de respuesta óptima (FRT); el 10% más lento de los tiempos de respuesta recíprocos para todas las pruebas, o dominio de lapsos (IRT); y el porcentaje de tiempos de respuesta  $\geq 500$  ms para todas las pruebas, o porcentaje de lapsos (LRT).

**Análisis estadístico.** Las diferencias entre los puntos de medición (marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre) se evaluaron mediante ANOVA de medidas repetidas. Las correlaciones bivariadas del tiempo medio de reacción con el inicio del sueño, la duración del sueño, la eficiencia del sueño, la media de sueño diurno y la duración media de las siestas se exploraron a través de pruebas de correlación de Pearson, ajustadas por comparaciones múltiples mediante el procedimiento de Bonferroni. Para evaluar si la época del año modulaba la asociación entre parámetros de sueño y de alerta se utilizó un modelo lineal mixto.

**Aspectos éticos.** El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes (Argentina) y se realizó de acuerdo con la Declaración de Helsinki y sus enmiendas. Se informó a los participantes sobre la naturaleza y el propósito del estudio y luego se les invitó a participar. Todos los participantes proporcionaron consentimiento informado por escrito.

## **Estudio 2: Modelado biomatemático de la fatiga en tropas de operaciones especiales**

**Diseño.** Se trata de un diseño analítico, observacional, longitudinal, y de alcance exploratorio, donde se evaluaron parámetros de sueño, alerta y rendimiento en un grupo de cursantes del curso de “Cazadores de Montaña” de la Escuela Militar de Montaña «Tte. Gral. Juan Domingo Perón», ubicada en la ciudad de Bariloche, Prov. de Río Negro. La finalidad de esta capacitación es proporcionar al personal militar los conocimientos particulares para planificar, conducir y/o ejecutar operaciones especiales. El estudio se llevó adelante en la tercera semana de instrucción, correspondiente al uso de armas de fuego en un polígono de tiro, durante cinco días entre el 16 y 20 de octubre de 2023. Se registró actigrafía en forma continua y se tomaron tres pruebas de alerta por día.

**Muestra.** Se incluyeron 26 cursantes que superaron las pruebas iniciales de selección y no abandonaron el curso en las primeras semanas.

**Actigrafía y registros de sueño.** El ritmo sueño-vigilia fue evaluado por actimetría mediante el uso de acelerómetros de muñeca (ActTrust, Cóndor Instruments, San Pablo, Brasil), tomando para este estudio el parámetro de duración de sueño.

**Test de vigilancia psicomotora.** A los fines de cuantificar el grado de alerta de los sujetos se evaluó su reacción psicomotora mediante una prueba desarrollada para Tablets, por el Laboratorio de Cronofisiología del Instituto de Investigaciones Biomédicas (BIOMED, UCA-CONICET), en conjunto con Sistemas Reid (Buenos Aires, Argentina). El así llamado “Test de Reacción Simple” (TRS) es una adaptación para Tablets del PVT descrito más arriba. Para este estudio se tomó en cuenta el parámetro de MRT.

**Modelado biomatemático de la fatiga (MBMF).** El MBMF consiste en un algoritmo que modela el rendimiento, teniendo en cuenta los diferentes procesos que determinan el ritmo sueño – vigilia (Figura 2). El MBMF tiene en cuenta el proceso circadiano (C), que hace referencia al ritmo circadiano de alerta presente en humanos y comprende funciones cosenoidales, con cinco armónicos. El proceso homeostático (S) tiene en cuenta el tiempo transcurrido desde el momento en el que la persona se despierta. Se trata de una función exponencial que demuestra la caída en el nivel de alerta con el paso del tiempo. Este proceso tiene valores muy altos al despertar, y luego cae rápidamente hasta llegar a un valor mínimo asintótico. Para el presente trabajo se utilizó el modelo 2-B Alert, desarrollado por el Instituto Walter Reed de Investigación de EEUU.

Las ecuaciones del MBMF presentan parámetros que deben ser ajustados a la población en estudio (por ejemplo, la fase del ritmo circadiano y el nivel medio de alerta), de acuerdo con mediciones objetivas del estado de alerta (en este caso, el PVT). A tal fin, en el presente trabajo se presentan los resultados preliminares del grado de ajuste del modelo a las predicciones de alerta, luego de haber utilizado los siguientes métodos de optimización: i. Parámetros originales reportados en la literatura; ii. Parámetros ajustados por una optimización no lineal (método de Nelder-Mead) tomando los datos en forma grupal; iii. Ídem tomando los datos en forma individual; iv. Aprendizaje Bayesiano, para datos individuales y en tiempo real; v. Filtro de Kalman Extendido, para datos individuales y en tiempo real (EKF).<sup>4</sup>

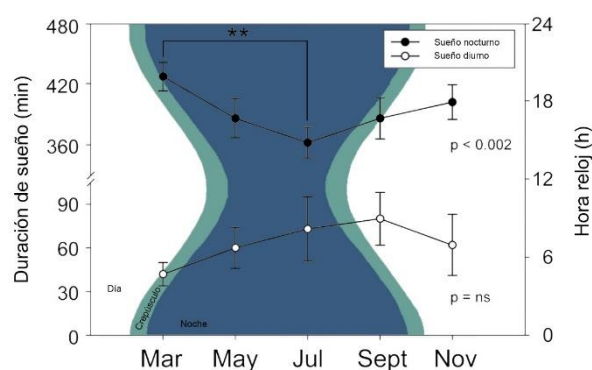
**Plan de análisis.** Se cuantificó el grado de ajuste de cada uno de los modelos mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Además, para los modelos con ajustes individuales (iii, iv y v) se evaluó la significancia estadística del ajuste mediante un modelo lineal mixto.

**Aspectos éticos.** El estudio fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación del Hospital Naval “Dr. Pedro Mayo”. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado antes de participar del estudio. El trabajo fue llevado a cabo en un todo de acuerdo con los principios y pautas establecidas en la Declaración de Helsinki.

## RESULTADOS

### Estudio 1: Impacto de la noche polar y el aislamiento extremo en el sueño y la fatiga en operaciones antárticas.

**Sueño.** La duración media del sueño disminuyó significativamente durante la noche polar (julio) ( $p < 0.002$ , Figura 2), mientras que se observó un inicio del sueño más tardío durante el mismo periodo, aunque no de manera estadísticamente significativa ( $p < 0.051$ ). El final del sueño y la eficiencia del sueño (Figura 2) no mostraron cambios significativos a lo largo del año. En relación a las siestas, la duración promedio del sueño diurno y la relación entre el sueño diurno y nocturno para la tripulación duplicaron sus valores en julio en comparación con marzo, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Figura 2). Los participantes tomaron, en promedio, alrededor de tres siestas semanales en cada punto de medición. El episodio de siesta en sí (es decir, no el promedio diario de sueño diurno), que se calculó solo para aquellos individuos que tomaron al menos una siesta durante cada periodo de medición (en lugar de toda la tripulación), aumentó significativamente su duración con un máximo de  $164 \pm 28$  min en septiembre, y se retrasó significativamente su inicio (con un máximo significativo en julio) y su final (con máximos significativos en julio y septiembre). La eficiencia del sueño durante la siesta también mostró cambios significativos, aumentando a partir de mayo, llegando a un máximo en noviembre.



**Figura 2. Sueño nocturno y diurno en Belgrano II.** La duración del sueño nocturno disminuyó en julio. La duración promedio del sueño diurno y la relación entre el sueño diurno y nocturno para la tripulación mostraron un aumento no significativo durante el invierno. Se muestran medias  $\pm$  SEM. Las diferencias estadísticas fueron evaluadas mediante ANOVA de medidas repetidas seguido de pruebas post-hoc de Bonferroni ( $** p < 0.01$ ). En el fondo, se observa la duración de la luz solar natural (luz diurna + crepúsculo civil) y los períodos nocturnos.

**Alerta.** La Tabla 1 muestra los valores matutinos y vespertinos derivados de la administración del PVT. Ninguna de las variables analizadas mostró cambios significativos a lo largo del año.

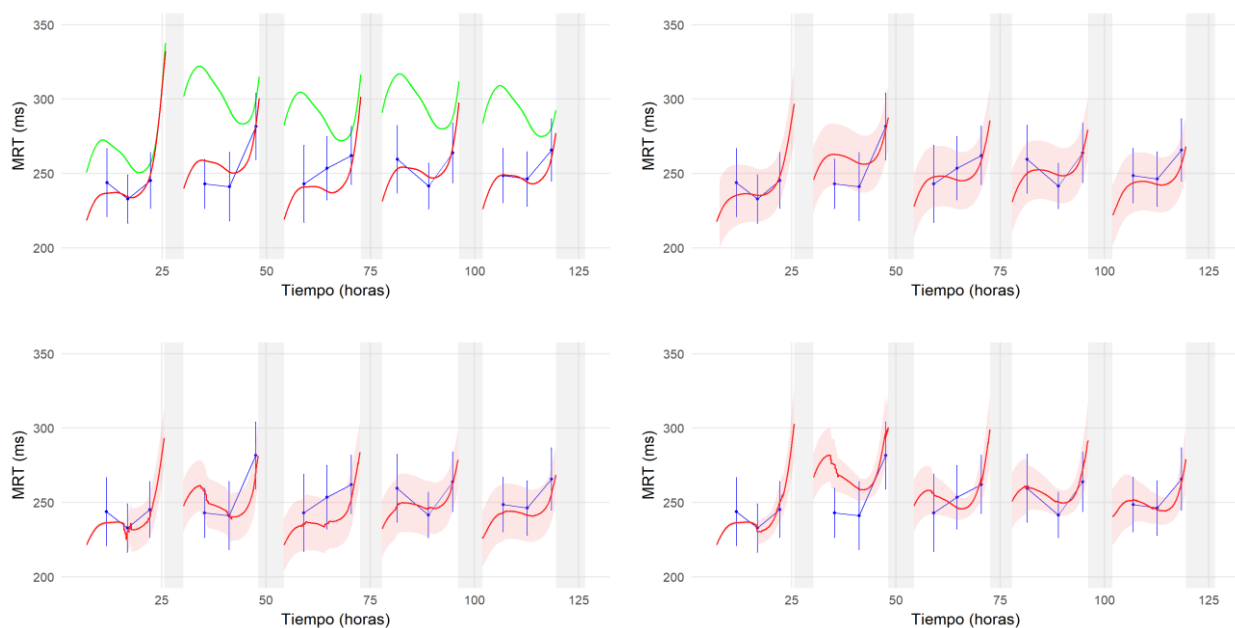
	Mar		May		Jul		Sept		Nov		p
	Media	SE	Media	SE	Media	SE	Media	SE	Media	SE	
<b><i>Mañana</i></b>											
MRT (ms)	284	8	290	15	284	11	282	11	286	13	.470
SRT (ms)	83	10	129	22	111	23	93	18	94	19	.917
FRT (ms)	209	5	205	6	204	4	205	4	206	6	.161
IRT (1/ms)	2.36	.08	2.27	.11	2.48	.17	2.45	.15	2.36	.17	.839
LRT (%)	2.2	.5	4.6	1.9	2.5	.8	2.4	.8	3.0	.9	.615
<b><i>Noche</i></b>											
MRT (ms)	294	13	291	16	305	21	292	12	301	20	.869
SRT (ms)	130	25	124	26	107	26	92	19	112	25	.325
FRT (ms)	209	8	203	5	209	6	210	5	210	8	.382
IRT (1/ms)	2.24	.13	2.38	.19	2.28	.21	2.39	.14	2.35	.22	.601
LRT (%)	3.6	.8	3.4	1.4	4.5	2.0	2.3	.8	4.9	2.2	.805

**Tabla 1: Test de reacción psicomotora (PVT).** MRT: tiempos de respuesta promedio para todas las pruebas; SRT: desviación estándar de los tiempos de respuesta para todas las pruebas; FRT: 10% más rápido de los tiempos de respuesta para todas las pruebas; IRT: 10% más lento de los tiempos de respuesta recíprocos para todas las pruebas; LRT: porcentaje de tiempos de respuesta  $\geq 500$  ms para todas las pruebas. Todas las variables mostraron diferencias no significativas entre las mediciones. ANOVA de medidas repetidas seguido de prueba post-hoc de Bonferroni.

**Asociación entre sueño y alerta.** No encontramos correlaciones significativas al evaluar las asociaciones del sueño con el estado de alerta en cada punto de medición. Sin embargo, los resultados de los análisis de modelos lineales mixtos revelaron un efecto significativo del momento del año en la asociación de la duración media de las siestas con el MRT matutino ( $p < 0.040$ ) y en la asociación del inicio del sueño ( $p < 0.004$ ) y el % de ritmo ( $p < 0.001$ ) con el MRT vespertino.

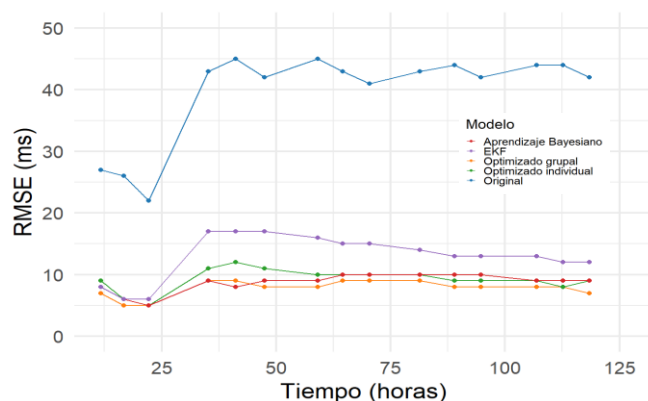
## **Caso 2: Modelado biomatemático de la fatiga en tropas de operaciones especiales.**

La duración de sueño mediana (IQR) fue de 297 (254-339) min y la eficiencia de sueño de 84 (80-92). En la figura 3 se muestran los resultados correspondientes a las predicciones de alerta obtenidas por el MBMF según los distintos modelos de optimización, junto con los datos reales obtenidos por el PVT. De acuerdo con lo esperado, se observa que el modelo original (es decir, sin ajustar) se aleja mucho de los resultados del PVT, mientras que las otras estrategias se adecúan de mejor forma.



**Figura 3. Optimización del MBMF.** Arriba a la izquierda. Modelo original con parámetros reportados por la literatura (verde) y optimización grupal (rojo). En azul, se muestran los valores del PVT. Arriba a la derecha: Optimización individual tomando todos los datos en forma conjunta. Abajo a la izquierda: Optimización individual en tiempo real por aprendizaje Bayesiano. Abajo a la derecha: Optimización individual en tiempo real por Filtro de Kalman Extendido. En todos los casos se muestran medias e IC95%.

La figura 4 muestra el RMSE para cada modelo. Salvo el modelo original con los parámetros tomados de la literatura (sin ajustar), todos presentan valores menores a los 20 ms. El grado de significancia estadística de los modelos ajustados individualmente fue alto ( $p < 0.01$ ).



**Figura 4. RMSE para los distintos modelos.** Salvo el modelo original con los parámetros tomados de la literatura (sin ajustar), todos presentan valores menores a los 20 ms.



## DISCUSIÓN

En este trabajo se presentaron resultados que describen las características de sueño y alerta en dos escenarios de operacionales de las FFAA; las actividades antárticas y el entrenamiento de tropas especiales.

El hallazgo principal del primer estudio es que los miembros de la tripulación durmieron en promedio una hora menos durante julio (invierno polar) en comparación con marzo y, en menor medida, noviembre. Aunque no fue estadísticamente significativo, también encontramos evidencia sugerente de un retraso en la conciliación del sueño durante esta estación. Por primera vez en una dotación antártica, mostramos que más de la mitad de los participantes eligieron tomar al menos una siesta semanal, y durante el invierno, el inicio de la siesta se retrasó, su duración aumentó y su eficiencia mejoró, lo que sugiere un aumento en la presión del sueño. No está claro si las siestas se prolongaron como consecuencia de un sueño nocturno más corto, o viceversa. Por otro lado, no encontramos deterioros en el rendimiento a lo largo del año utilizando el PVT de 5 minutos. En este sentido, existen pocos informes sobre modificaciones en la alerta durante las estancias en la Antártida, con resultados contradictorios. Además, no se pudo establecer una correlación entre el sueño y los ritmos circadianos con la alerta. Probablemente, la disminución en la duración del sueño puede no haber sido suficiente para determinar cambios en la atención sostenida medida por el PVT. Sin embargo, encontramos un papel modulador de la estacionalidad en la correlación entre el inicio del sueño y el ángulo de fase con el tiempo de reacción promedio. Estos resultados nos muestran los factores que deberán considerarse a la hora de aplicar el MBMF en futuros estudios en este entorno operacional.<sup>3,5</sup>

En cuanto al segundo estudio, el resultado principal muestra que los parámetros para el MBMF reportados por estudios previos llevan a predicciones del modelo que no son adecuadas en el entorno en que las utilizamos. En contraste, la optimización de los parámetros por los métodos descriptos arrojó resultados adecuados y similares entre sí, siendo de interés el modelo EKF, que permite un ajuste individualizado y en tiempo real a los resultados del PVT, con un coste computacional bajo. A diferencia de otros estudios realizados en condiciones controladas de privación de sueño en laboratorios, en este trabajo analizamos una situación naturalística, donde los sujetos experimentaron niveles de privación de sueño menos severos que los comúnmente empleados en las validaciones reportadas en la literatura. En futuros análisis se evaluará la capacidad del MBMF para predecir rendimiento en las pruebas de tiro realizadas, que constituyen un buen modelo de situaciones de dificultad variable que pueden encontrarse en una situación operacional real. Además, la herramienta informática desarrollada nos permite contar con una plataforma de prueba de modificaciones, incluyendo la utilización parámetros de alerta distintos del MRT y la incorporación de parámetros de calidad de sueño (actualmente no considerados en el 2B Alert).<sup>6,7</sup>

Hasta la fecha, el MBMF no ha sido probado en entornos militares reales. Los resultados preliminares obtenidos nos permitirán seguir desarrollando los modelos para crear estrategias personalizadas de gestión de la fatiga y del rendimiento en entornos operacionales de las Fuerzas Armadas. Comprender si estos modelos permiten anticipar caídas en el rendimiento en tareas complejas, podrá favorecer su adopción más amplia como parte de sistemas de gestión de riesgo de fatiga.

## Agradecimientos

Los resultados del caso 1 fueron publicados en <sup>(3)</sup>, como parte de un estudio en colaboración con el Instituto Antártico Argentino / Dirección Nacional del Antártico, el Comando Conjunto Antártico, UNQ y UdeSA. Financiamiento: PIDEFF 2014–2017 n°06, Ministerio de Defensa. Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (ANPCyT) PICTO 2017–0068. Office of Naval Research Global, Grant Number N62909- 22–1-2008.

## Bibliografía

1. Capaldi, V. F., Balkin, T. J. & Mysliwiec, V. Optimizing Sleep in the Military: Challenges and Opportunities. *Chest* **155**, 215–226 (2019).
2. Ramakrishnan, S., Wesensten, N. J., Balkin, T. J. & Reifman, J. A Unified Model of Performance: Validation of its Predictions across Different Sleep/Wake Schedules. *Sleep* **39**, 249–262 (2016).
3. Folgueira, A. *et al.* Sleep, napping and alertness during an overwintering mission at Belgrano II Argentine Antarctic station. *Sci Rep* **9**, 10875 (2019).
4. Liu, J., Ramakrishnan, S., Laxminarayan, S., Balkin, T. J. & Reifman, J. Real-time individualization of the unified model of performance. *J Sleep Res* **26**, 820–831 (2017).
5. Tortello, C. *et al.* Chronotype delay and sleep disturbances shaped by the Antarctic polar night. *Sci Rep* **13**, 15957 (2023).
6. Priezejev, N. V., Vital-Lopez, F. G. & Reifman, J. Assessment of the unified model of performance: accuracy of group-average and individualised alertness predictions. *J Sleep Res* **32**, e13626 (2023).
7. Reifman, J. *et al.* 2B-Alert App: A mobile application for real-time individualized prediction of alertness. *J Sleep Res* **28**, e12725 (2019).