



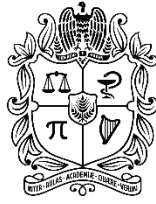
UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Efectos fisiológicos  
cardiovasculares y musculares del  
ejercicio, en expedicionarios  
Antárticos: Una revisión de alcance  
“scoping review”**

**Juliana Fuentes Franco**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad Medicina, Departamento de Ciencias Fisiológicas  
Bogotá D.C, Colombia

2024



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Cardiovascular and muscular physiological effects of exercise in Antarctic expeditionaries: A scoping review**

**Juliana Fuentes Franco**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad Medicina, Departamento de Ciencias Fisiológicas  
Bogotá D.C, Colombia  
2024

# **Efectos fisiológicos cardiovasculares y musculares del ejercicio, en expedicionarios Antárticos: Una revisión de alcance “scoping review”**

**Juliana Fuentes Franco**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Fisiología**

Directora:

MD. MSc. María Alejandra Corzo Zamora

Línea de Investigación:

Es fisiología y desempeño humano en ambientes especiales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Medicina, Departamento de ciencias fisiológicas

Bogotá D.C, Colombia

2024





## *Dedicatoria*

*A mi familia que siempre ha confiado en mis habilidades y tenacidad, a mi esposo quién ha sido el soporte emocional ante la tormenta, a mi tutora que con su empatía me ha acompañado de la mano en este proceso y a mi grupo de amigos de la maestría quienes siempre han sido la voz de fortaleza para sobrepasar las adversidades.*







## Resumen

La Antártida es un continente de alto interés en el desarrollo de la exploración espacial, se ha reconocido desde la fisiología humana como un análogo a las situaciones que podrían presentarse en expediciones espaciales. El aislamiento, el confinamiento y ambientes extremos (ICE) son condiciones que requieren de ciertas medidas que disminuyan el impacto en la salud y el bienestar de los expedicionarios. El ejercicio físico busca disminuir dicho impacto en el cuerpo humano; por lo tanto, se realizó una revisión de alcance tipo scoping review, que permitiera analizar los efectos del ejercicio físico en la fisiología cardiovascular y muscular en la Antártida.

Se realizó una investigación secundaria de la literatura, una revisión de alcance tipo scoping review siguiendo el manual PRISMA- ScR, se utilizaron bases de datos especializadas PubMed, Ebsco, Scopus y Google Scholar, se seleccionaron los artículos por título y resumen por medio del aplicativo Rayyan, se filtraron los duplicados y se tuvo en cuenta criterios de inclusión y exclusión para realizar el cribado. A marzo del 2024 se recopilaron 1991 artículos de las bases de datos, como resultado se incluyeron un total de 8 investigaciones que cumplieron con los criterios y fueron utilizadas para la presente revisión a partir de los cuales se realiza una narrativa en tres capítulos.

Se concluyó que las expediciones antárticas generan aumentos en la fuerza muscular y disminuye la DMO en estructuras como la columna vertebral y tronco; por su parte, el sistema cardiovascular sufre un aumento de la actividad simpática y una disminución parasimpática que resalta fatiga, estrés y baja capacidad de recuperación en este ambiente; así mismo, la aptitud aeróbica medida por el VO<sub>2</sub>max aumenta o disminuye significativamente posterior a una expedición antártica dependiendo de la condición física previa del expedicionario, del estímulo generado y el tipo de misión realizada.

**Palabras clave: Antártida, ejercicio físico, efectos fisiológicos cardiovasculares y musculares.**



## Abstract

### **Physiological cardiovascular and muscular effects of exercise in Antarctic expeditioners: A scoping review**

Antarctica is a continent of high interest in the development of space exploration and has been recognized from human physiology as an analogue to situations that could arise in space expeditions. Isolation, confinement, and extreme environments (ICE) are conditions that require certain measures to reduce the impact on the health and well-being of the expedition members. Physical exercise seeks to diminish such impact on the human body; therefore, a scoping review was conducted to analyze the effects of physical exercise on cardiovascular and muscular physiology in Antarctica.

A secondary literature review was conducted, and a scoping review was carried out following the PRISMA-ScR manual. Specialized databases including PubMed, Ebsco, Scopus, and Google Scholar were used, and articles were selected by title and abstract using the Rayyan application. Duplicates were filtered, and inclusion and exclusion criteria were considered for screening. As of March 2024, 1991 articles were collected from the databases, and a total of 8 research papers that met the criteria were included and used for the present review, from which a narrative in three chapters was developed.

It was concluded that Antarctic expeditions lead to increases in muscle strength and decrease in BMD in structures such as the vertebral column and trunk. The cardiovascular system experiences an increase in sympathetic activity and a decrease in parasympathetic activity, highlighting fatigue, stress, and low recovery capacity in this environment. Similarly, aerobic fitness measured by VO<sub>2</sub>max significantly increases or decreases after an Antarctic expedition, depending on the expedition member's previous physical condition, the stimulus generated, and the type of mission performed.

**Keywords:** Antarctica, physical exercise, cardiovascular and muscular physiological effects.

## Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de Ilustraciones .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de Gráficas .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>7</b>
<b>Pregunta del problema .....</b>	<b>9</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Marco Teórico .....</b>	<b>13</b>
1.1 La Antártida .....	13
1.2 Fisiología en la Antártida.....	14
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>19</b>
2.1 Objetivo general .....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
<b>3. Metodología.....</b>	<b>21</b>
3.1 Protocolo y registro .....	21
3.2 Tipo de investigación .....	21
3.3 Pregunta de investigación.....	21
3.4 Análisis PCC.....	21
3.5 Criterios de inclusión de estudios.....	22
3.6 Criterios de exclusión de estudios.....	22
3.7 Fuentes de búsqueda .....	23
3.8 Estrategia de búsqueda .....	23
3.9 Proceso de recolección de datos de revisión .....	24
3.10 Presentación de resultados .....	24

---

<b>4. Resultados</b> .....	<b>25</b>
4.1 Características de resultados .....	26
4.2 Caracterización de misiones antárticas .....	30
4.3 Efectos fisiológicos en el sistema cardiovascular y muscular en Antártida .....	35
4.4 Los efectos del ejercicio en la Antártida .....	42
<b>Discusión</b> .....	<b>59</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>65</b>
Recomendaciones y perspectivas.....	67
<b>Bibliografía</b> .....	<b>69</b>

## Lista de Ilustraciones

	Pág.
<b>Ilustración 1.</b> Representación esquemática de la estación de investigación Concordia (Agencia Espacial Europea) Van Ombergen, 2021 (27).....	34
<b>Ilustración 2.</b> Descripción de la expedición de 33 semanas (A) , los cambios de altimetría (B) y los cambios de la saturación de presión de oxígeno (SpO2) (C). O'Brien 2018. (21) .....	36
<b>Ilustración 3.</b> Resultados de los cambios en el Vo2max corregido a % magro (A), contracción máxima voluntaria MVC (B), comportamiento estadístico de RER presentado en percentiles del VO2max (C) y el área bajo la curva (AUC) para RER (D). Se presentan valores por sujeto O'Brien 2018 (21). .....	39
<b>Ilustración 6.</b> Clasificación del esfuerzo físico por zonas de trabajo respecto a la frecuencia cardiaca durante la expedición, Moraes et al. 2018 (23).....	45

---

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Análisis población, contexto y concepto PCC de la pregunta de investigación.	21
<b>Tabla 2.</b> Términos Mesh para la búsqueda y marcador booleano .....	23
<b>Tabla 3.</b> Registro de búsqueda .....	23
Tabla 5. Características de resultados .....	27
<b>Tabla 6.</b> Características de voluntario (n=9) investigadores (n=7) montañistas (n=2) evaluados antes y después de la expedición Antártida. Moraes et al, 2018 (23). .....	43
Tabla 7. Resultados sobre el impacto de la expedición en valores pre- expedición, post expedición y valores de significancia $P < 0,05$ ; se presentan valores tanto por género como valores del grupo, Parent et al. 2018 (25). .....	54
<b>Tabla 8.</b> Caracterización de los expedicionarios. Simpson & Maynard 2012 (30). .....	55

## Lista de Gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) en etapa 1. travesía en barco. *significancia respecto al día 2 ( $p < 0,05$ ) y # significancia respecto al día 16. Moraes et al. 2020 (13) .....	41
---	----



## Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo para scoping review con registro de revisión en base de datos. PRISMA 2020(17). .....	26
---	----



## Introducción

La Antártida o Antártica es un continente ubicado en el hemisferio sur de la tierra, rodeado por el Océano Antártico, también conocido por su ubicación geográfica como Polo Sur, cubierto en su mayoría por hielo, lo que le confiere las características a un ambiente de temperaturas extremadamente bajas, baja humedad relativa y alta radiación UV. “Para los propósitos del Sistema del Tratado Antártico, la Antártida es definida como todas las tierras y barreras de hielo ubicadas al sur del paralelo 60° Sur, sin afectar derechos sobre el mar allí existente.”(1)

Por su importancia en temas como la regulación del clima, la biodiversidad, recursos naturales, entre otros; se ha promovido por muchos años la investigación y exploración desde el cuidado ecológico, hasta otras grandes líneas de investigación, reconociendo que los resultados que se obtienen no solamente describen y explican el ambiente del lugar en específico sino su implicación en el resto del planeta, en el comportamiento del ser humano en diferentes ambientes e incluso como un análogo al ambiente espacial.

Dada su importancia ecológica se generó el tratado Antártico, el cual, es una serie de acuerdos que se generaron colectivamente entre países “el Tratado Antártico fue hecho en Washington el 1 de diciembre de 1959” (2); sin embargo hay países miembros que tienen poder de decisión denominados “miembros consultivos” y otros que aunque hacen parte, no tienen posibilidad de votar en decisiones, denominados “miembros no consultivos”. Los acuerdos que integran estos tratados son:

1. La convención para la conservación de las focas Antárticas; demarca y regula la caza y la captura de especies de fauna y flora que hacen parte fundamental de la vida marina para su conservación y sostenibilidad.
2. Convención para la conservación de recursos vivos marinos Antárticos, siendo de gran importancia para salvaguardar el medio ambiente y el ecosistema en el mar, delimitando los parámetros para la recolección o uso con fines científicos.
3. El protocolo al tratado Antártico sobre protección al medio ambiente: el cual tiene como principio el cuidado del medio ambiente Antártico y ecosistemas, la conservación de su valor ecológico, biodiversidad y su importancia como área para la investigación científica; siendo fundamental para el entendimiento y la planeación de actividades a realizarse allí.

Al reconocer la importancia de estos elementos, la oportunidad de crecimiento científico, el aporte desde la biodiversidad del país y la enorme capacidad para desarrollar proyectos; Colombia, inició su proceso institucional para hacer parte de este sistema. Es así como inicia en 1989 su ingreso al tratado Antártico como miembro no consultivo, posteriormente en el 2014 al 2015 hubo la primera expedición científica colombiana con un grupo de 21 investigadores, esta etapa que se ampliará a continuación, fue fundamental como parte de un programa Antártico colombiano dividido en 5 fases.

La primera etapa consistió en la primera exploración en zona Antártica en cooperación con otros países y estaciones científicas en la Antártida de Chile, Perú y Ecuador, así como acciones políticas cooperativas. La segunda etapa se centró en la exploración a la Antártida, pero con naves propias del país, favoreciendo el desplazamiento, la organización y el soporte para estas misiones, potencializando la capacidad investigativa nacional. Es en el 2014 al 2015 que se realiza la primer expedición colombiana en naves propias (un buque, 2 botes tipos zodiac, 1 bote tipo defender y 1 helicóptero) denominada “La expedición caldas” en el cual se desarrollaron 9 proyectos de investigación de biología, física, geología, química y desde la fisiología humana se realizó un estudio con el objetivo de “Determinar los cambios fisiológicos cardiorrespiratorios y de composición corporal que

---

se presentan en la aclimatación aguda a temperaturas extremas y al ejercicio en un grupo de militares colombianos durante la primera expedición a Antártida”(3).

Luego, se realizó la expedición “Almirante Lemaitre” conformada por 24 investigadores, entre el 2015 al 2016 durante el verano austral en cooperación con cuatro países (Argentina, Chile, Ecuador e Italia), estos investigadores fueron repartidos en diferentes estaciones, buques o bases. Como resultado se realizaron investigaciones en 8 líneas tales como, ecología, biología, fisiología humana, biología marina entre otras disciplinas. En la línea de fisiología humana, el objetivo fue “Determinar los cambios fisiológicos cardiorrespiratorios y de composición corporal que se presentan en la aclimatación aguda a frío extremo en un grupo de tripulantes de vuelo en una misión aérea a la Antártida” (4).

La tercera expedición tuvo lugar del 2016 al 2017 denominada “Almirante Padilla”, como continuidad de las dos expediciones previas, varias investigaciones se mantuvieron, en este, hicieron parte 48 investigadores con 34 proyectos de investigación y fue favorecido por diferentes cooperaciones en las bases de países igualmente interesados por el desarrollo científico. En fisiología humana se realizó un “Estudio sobre el manejo de la coordinación visomotora en pilotos de embarcaciones menores durante maniobras navales bajo sensación térmica en la Antártida” y “5 Variables asociadas a la alimentación del hombre colombiano frente a la adaptación y supervivencia en condiciones adversas bajo temperaturas extremas en la Antártida” (5).

La cuarta misión “Almirante Tono” en el verano austral del 2017 al 2018 como continuidad a los proyectos de investigación, se contó con 41 investigadores y 25 proyectos; se desarrolló en fisiología humana la investigación “Determinación de cambios fisiológicos cardiorrespiratorios y de composición corporal y su correlación con factores ambientales (tripulaciones humanas)” (6).

Posteriormente, se llevaron a cabo las etapas del programa Antártico colombiano, la etapa 3 y 4 que tenía como objetivo el establecimiento y funcionamiento de la estación científica

“Almirante Padilla” en la cual se recopilaron diferentes investigaciones de las expediciones previas, para su análisis; así mismo, la etapa 5 que tuvo como objetivo llegar al polo sur 90° de latitud sur, se encontraba en estudio, planeación y formación del proyecto para llevar a cabo en la 5 expedición “Almirante Campos” que se realizó en el verano austral del 2018-2019; sin embargo, aún no se conocen los resultados de tales investigaciones.

Todos estos desarrollos investigativos han permitido reconocer elementos fundamentales en el área de la fisiología humana, como la exposición a la hipoxia que ocurre en grandes altitudes, los efectos cardiorrespiratorios en un ambiente de temperaturas bajas extremas y con baja humedad relativa, los elementos estresores dados por el confinamiento en las bases científicas debido a los extensos inviernos (9 meses), el cambio antropométrico, la alimentación y otros factores a los cuales se exponen los expedicionarios, investigadores y grupos interdisciplinarios que generan estas misiones.

Por lo anterior, se presenta la investigación denominada efectos fisiológicos cardiovasculares y musculares del ejercicio, en expedicionarios Antárticos: una revisión de alcance “scoping review”, desarrollada a partir de una búsqueda bibliográfica utilizando metodología PRISMA-ScR. La presente revisión se caracteriza por estructurarse en una forma narrativa e ilustrativa de los hallazgos encontrados, se distribuyó en tres capítulos de resultados principales, el primero una caracterización del tipo de expediciones que se realizan en la Antártida y las diferentes condiciones en las que se puede encontrar el investigador; el segundo, una revisión de los efectos cardiovasculares y musculares principales en la Antártida encontrados en la revisión actual y finalmente un capítulo que logra recopilar la poca información existente sobre los efectos cardiovasculares y musculares que genera el ejercicio en un ambiente extremo como lo es la Antártida.

## Planteamiento del problema

La Antártida es un territorio inhóspito y apartado de la civilización, al cual se le ha priorizado políticamente dada su relevancia en la investigación ambiental, biológica y en el desarrollo del hombre como especie; dadas las condiciones ambientales y topográficas del entorno extremo y a sus exclusivos retos; se ha considerado en la fisiología humana como un análogo para la exploración espacial, como un precursor de las misiones espaciales como la proyección de la NASA de volver a la Luna y la ambiciosa misión de ir a Marte.

Este continente impone condiciones de salud física y mental, así como en el rendimiento humano, resumido como las condiciones ICE (isolation, confinement and extreme), las cuales se vivencian tanto en entornos naturales que por muchos años de investigación se han construido como barcos, estaciones y campamentos, espacios que han permitido la permanencia del hombre en el continente; sin embargo, que han permitido entrever la necesidad de contrarrestar las condiciones en la cuales el investigador, expedicionario, personal militar, entre otros, se va a ver expuesto (7).

Aquellos expedicionarios que realizan misiones diversas en este lugar, pueden durar de pocas semanas, 6 meses, un año o más (hivernautas) en entornos diversos presentándose las anteriores condiciones ICE (7); así mismo, las estaciones pueden estar ubicadas en lugares con altas altitudes, la elevación máxima es el Monte Vinson a 4.892 m (8) o a campamentos a nivel del mar; de la misma manera, las actividades que el expedicionario realiza puede ser dentro de la base o por fuera de la misma, realizando caminatas en lugares topográficamente retadores, caminatas en montaña, zonas de nieve y/o rocosas, contra vientos; en consecuencia, las misiones más extensas en temporada de invierno austral, requiere del aislamiento y el confinamiento en bases, cambios en la exposición de luz día, trastornos en el sueño, entre otros.

Reconociendo este contexto e identificando el aumento potencial de expedicionarios colombianos al continente blanco, se hace fundamental identificar cuáles son los efectos fisiológicos en el sistema cardiovascular y en el músculo esquelético en expediciones antárticas que se han reportado en la literatura; los cuales, no solamente permiten registrar el comportamiento funcional del ser humano; sino que “Considerando que una mayor aptitud aeróbica es ventajosa para realizar un trabajo físico intenso y para regular la temperatura corporal durante una exposición al frío” (9), como investigadores, priorizar el ejercicio físico como una contramedida antes, durante y después de estas misiones, en la mitigación de riesgos, potencialización del rendimiento, y un mejoramiento de las condiciones de salud mínimas que en el entrenamiento pre antártico se podrían contextualizar y desarrollar previa a toda misión.



## **Pregunta del problema**

¿Cuáles son los efectos fisiológicos cardiovasculares y músculo esqueléticos del ejercicio físico en expedicionarios Antárticos?



## Justificación

Desde la expedición Caldas en 2014 que fue la primera que se realizó por una tripulación de colombianos, se han realizado diversas investigaciones en el campo de la biología, geografía, física, química, fisiología humana, entre otras. Estos hallazgos han permitido reconocer la capacidad de aclimatación del ser humano a ambientes extremos y situaciones adversas, aumentando el conocimiento científico para mejorar las exploraciones espaciales y el reconocimiento de nuevos ambientes en donde el ser humano podría desarrollarse de manera óptima. Así mismo, al identificar aquellas adversidades que tiene que sobrellevarse y los efectos que estas mismas le generan, las investigaciones han generado estrategias para mejorar la estancia de las tripulaciones en la Antártida, desde la suplementación nutricional, la implementación de trajes adecuados, la incursión en la comunicación durante etapas de confinamiento y el ejercicio como herramienta para contrarrestar los efectos negativos y potencializar las adaptaciones musculoesqueléticas y cardiovasculares (10).

No obstante, esto es incierto, aunque las experiencias narrativas de muchos expedicionarios han permitido reconocer la importancia de la preparación física para las misiones antárticas en diversas dimensiones del ser humano, hay una amplia limitación en el campo acerca de la información científica que permita reforzar los protocolos metodológicos de ejercicio físico aplicados en las instituciones como contramedidas en el ambiente antártico.

En el contexto colombiano, al igual que a nivel internacional, los expedicionarios antárticos proceden de las fuerzas militares y de instituciones civiles como los institutos Antárticos, las cuales se encargan del mantenimiento de bases y de desarrollar proyectos de investigación. Es así, que la condición física de los expedicionarios es variable y previo a la expedición va a determinar no solo su rendimiento para el cumplimiento de objetivos, sino también, puede influir en los riesgos propios de sus actividades.

Así mismo, se debe tener en cuenta que las bases en la Antártida están localizadas a diferentes alturas y en terrenos con diferentes grados de frío y configuración, por lo que la aptitud física puede influir en el acceso a bases o terrenos cercanos e inclusive en la respuesta a emergencias presentadas en la expedición.

En consecuencia, la presente revisión de alcance recopila bibliografía sobre un tema del cual no ha sido muy estudiado y del que aún se desconoce en gran medida; así mismo, es un precursor para profesionales en el área de la salud y maestrantes en fisiología para promover una revisión sistemática e incluso una investigación experimental identificando protocolos y metodologías para ser aplicados en las instituciones de nuestro país. Por lo tanto, la estructuración de esta revisión está guiado por la pregunta de investigación orientada a dos sistemas que son influenciados por la condición física.

---

# 1. Marco Teórico

## 1.1 La Antártida

La Antártida es el continente más austral de la tierra, debido a su ubicación al sur del paralelo 60° al sur. Es caracterizado por su ambiente de temperaturas bajas extremas, una mayoritaria cobertura de hielo, un ambiente seco, temporadas de verano e invierno con características particulares y un lugar de alto interés en las investigaciones sobre el impacto en salud física y psicológica en los humanos debido a la exposición al ambiente (confinamiento, temperaturas extremas, hipoxia, entre otras). Estas investigaciones hacen parte de un conjunto de estrategias para preparar y entender los efectos fisiológicos en los seres humanos, así como en las exploraciones espaciales, en cuevas subterráneas y en estaciones análogas. “En vista de los planes de la Agencia Espacial Europea (ESA) para futuras misiones humanas de exploración de larga duración, la estación Concordia actúa como un poderoso análogo de alta fidelidad, ya que replica muchas de las condiciones esperadas de una base lunar o marciana” (11). Estas analogías están representadas por la variación de periodos de luz diurno/nocturna, el confinamiento invernal (11 meses), la convivencia en un ambiente multicultural, condiciones ambientales como la hipoxia hipobárica (estación Concordia 3233msm), estrés hormonal, actividades de campo, caminatas en terreno accidentado, etc.

En la Antártida existen diversas bases permanentes lideradas por los países integrantes del acuerdo austral, una de estas, es la base franco-italiana Concordia, ubicada en un ambiente hostil con una presión de 645 hpa y un estrés hipóxico hipobárico, debido a su altitud (3.200msm), temperaturas bajas extremas (-51°C hasta -80°C en invierno), aislada por su localización (950km de la costa noroeste, a 1670 km del polo sur y a 560km de la estación vecina más cercana) y por el extenso invierno de febrero a noviembre, con periodos de luz prolongada de 3 meses en verano y 3 meses de oscuridad en invierno (11).

“El efecto combinado de todos estos factores hace que Concordia sea verdaderamente única en su capacidad de servir como un fiel análogo de las condiciones de los vuelos espaciales, especialmente en las áreas de fisiología humana, comportamiento y rendimiento, y actualmente bien puede ser la estación que mejor refleje el futuro de bases fuera de la tierra” (10); aunque es una de las bases en las que más información científica se ha reportado en investigaciones, no es similar a la mayoría de las estaciones que se encuentran a nivel del mar y con mayor posibilidad de acceso.

## 1.2 Fisiología en la Antártida

El ser humano tiene la capacidad de aclimatarse al ambiente en el cual se encuentra expuesto, desde selvas tropicales hasta zonas polares, generando variaciones en su organismo para favorecer la eficiencia en sus actividades diarias e intentando mantener la eficiencia del sistema y la sostenibilidad en dicho ambiente. En ambientes como el que se estudia en este texto, el reto de la aclimatación parte de suplir los requerimientos básicos para sostener un adecuado aporte de oxígeno y sustratos a órganos y tejidos en pro de potencializar las tareas humanas (cognitivas, físicas, sociales, etc).

En la Antártida uno de los grandes retos es la exposición a la hipoxia hipobárica, que consiste en la disminución de la presión de oxígeno relacionado con el aumento de la altitud y la presión barométrica “Concordia se encuentra a 1000 km de la costa, a una altitud de 3232 m, lo que lleva a una fracción inspiratoria de oxígeno calculada del 13 % y temperaturas tan bajas como  $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ” (12). Los bajos niveles de oxígeno son censados por baroreceptores que se localizan a nivel arterial y que van a activar factores inducibles por la hipoxia que conllevan a la transcripción génica y síntesis de proteínas. El HIF1 $\alpha$  (factor inducido por la hipoxia) en condiciones de normoxia es rápidamente hidroxilado por medio de prolin hidroxilasas (PHD) y sufre degradación proteosomal por ubiquitinación; sin embargo, con la disminución de oxígeno, el PHD se encuentra inhibido o inactivo y el HIF $\alpha$  se transloca al núcleo junto con el HIF $\beta$  formando un heterodímero y junto a coactivadores nucleares regulan la expresión de genes diana que contienen elemento de respuesta a la hipoxia (HRE) (13). La transcripción específica de este proceso de señalización celular, activa parámetros específicos como la eritropoyesis, el metabolismo celular y la angiogénesis; la eritropoyesis (formación de eritrocitos en la maduración de eritroblastos

en la médula ósea) con el aumento de la eritropoyetina (proteína censada por los riñones) y transferrina para el metabolismo del hierro y la producción de glóbulos rojos, esto conduce al aumento de la hemoglobina y hematocrito que aumenta el transporte de O<sub>2</sub> (indicadores hematológicos evaluado constantemente en las investigaciones que se presentarán a continuación); sin embargo, este efecto sobre las células sanguíneas no son los únicos reportados “La hipoxia crónica impacta en los megacariocitos provocando su proliferación y diferenciación. Estos hallazgos implican un aumento del metabolismo de la médula ósea con un posible efecto sobre otras poblaciones celulares”(12). Otros efectos sistémicos que responden a este cambio del oxígeno disponible son los ventilatorios con el aumento de la ventilación por minuto que implica un aumento de pH sanguíneo por la disminución del CO<sub>2</sub> produciendo una alcalosis respiratoria, esto conlleva una compensación metabólica a nivel de los riñones con la excreción del bicarbonato. (14)

Strewe et al. (11) realizó un análisis de los efectos crónicos de la exposición a la hipoxia hipobárica en parámetros de estrés hormonal/metabólico en la estación Concordia (gran altitud) en comparación con estación Neumayer III (nivel del mar); 15 participantes hombres sanos y 16 hombres sanos de las tripulaciones respectivamente, en diferentes expediciones, recolectaron los datos manteniendo un protocolo unificado. Las muestras se tomaron desde enero/febrero hasta Octubre/noviembre en temporada de invierno austral, que implica confinamiento, aislamiento, temperaturas bajas extremas y oscuridad prolongada. En respuesta a la hipoxia se identificaron diferencias significativas por un aumento del hematocrito y hemoglobina en Concordia (gran altitud) mucho mayor que en Neumayer III (nivel del mar); sin embargo, en este estudio buscaron relacionar respuestas al estrés con la respuesta a la hipoxia y para esto se midieron los endocannabinoides (CE): anandamida (AEA), 2-araquidonoilglicerol (2-AG), así como las N-aciletanolamidas (NAE), palmitoiletanolamida (PEA), oleoiletanolamida (OEA) y estearoiletanolamida (SEA); como resultados contradictorios en Neumayer III aumentaron los valores significativamente para todos los neurotransmisores en comparación con Concordia; al parecer la expresión de estos neurotransmisores se regularon a la baja en un ambiente de gran altitud, lo cual pudo deberse a la propia señalización de hipoxia y una integración con el metabolismo de los CE “la falta de regulación positiva de las CE en Concordia (gran altitud) podría deberse a la regulación positiva inducida por hipoxia de la COX-2 (y posiblemente otras enzimas) que a su vez oxida las CE en compuestos (por ejemplo, prostaglandinas-etanolamidas, hidrox-

AEA)" (11,15); adicionalmente los resultados de norepinefrina en la estación de Concordia evidenció una aclimatación crónica, ya que al inicio de la estancia hubo un aumento estadísticamente significativo pero paulatinamente se fue regulando hasta llegar a valores iniciales previos aún con la misma exposición a la hipoxia; la epinefrina y el cortisol no evidenciaron cambios significativos en Neumayer III y en Concordia aunque hubo variabilidad en las concentración medias, no se encontró ningún hallazgo importante estadísticamente analizado, un resultado inesperado para los autores pero que denotan respuestas de aclimatación muy variables entre los sujetos; "el patrón de reacción parece mostrar y expresar un proceso de aclimatación a largo plazo del cuerpo humano y la fisiología a estas condiciones en lugar de un proceso patológico, ya que su intensidad y eficiencia disminuyen con el tiempo para finalmente volver a un estado casi "normal" (11).

Aunque se conoce que uno de los desafíos del ser humano en la Antártida, es la exposición a la hipoxia, las diversas investigaciones buscan reconocer el nivel de aclimatación aguda y crónica en este ambiente y así mismo, distinguir los parámetros que pueden mejorarse previamente a una expedición a dichos lugares. Porcelli et al. (16) evaluaron 13 voluntarios sanos quienes tuvieron una estancia durante el invierno del 2014-2015 en la estación Concordia, a quienes se les evaluaron parámetros en sangre (venosa y arterial). Las concentraciones de hemoglobina aumentaron desde el día 7 posterior a la exposición y se mantuvo alto hasta el día 300 (último dato), sin embargo, la eritropoyetina tuvo su punto máximo el día 3 posterior a la exposición a la altura, pero se normalizó rápidamente para el día 7 y se mantuvo estable hasta el final. En el análisis de gases arteriales, evidentemente la saturación de O<sub>2</sub> se mantuvo baja toda la estancia, la PCO<sub>2</sub> disminuyó significativamente y se mantuvo respecto al valor de referencia (pre) durante todo el estudio, por lo tanto, el pH se mantuvo más alto, y el exceso de base fue inferior al pre hasta el día 300. Estos resultados permitieron reconocer los efectos que genera la estancia a largo plazo en expediciones en la Antártida y denotan un bajo nivel de aclimatación a la altura de los sujetos estudiados. No se realizaron otro tipo de evaluaciones que permitieran reconocer las repercusiones que se generan por la exposición prolongada a la hipoxia y por los niveles de alcalosis sostenidos. (16)



---

Acompañado de este ambiente hipóxico, las temperaturas extremas y la termorregulación, se ha relacionado con aumentos en la TSH aumentando la tasa metabólica por efectos de la exposición al frío y aumento en el ejercicio físico en desplazamientos utilizando ropa pesada y otras actividades que favorecieron ese aumento en la tasa metabólica “las concentraciones de TSH aumentaron gradualmente durante el período de acampada, lo que concuerda con la noción de que la TSH sérica aumenta en respuesta a la exposición prolongada al frío”(17). Aunque poco concluyente y explorado, se conoce que la exposición prolongada a temperaturas bajas genera atrofia muscular dado a la disminución de la señalización AKT que fosforila FOXO quien promueve la inhibición del crecimiento celular (18) .

Adicionalmente, los cambios comportamentales son de gran interés relacionado con el análisis fisiológico en expedicionarios de la Antártida en relación con los cambios de ánimo por factores estresores como el confinamiento durante el invierno “el confinamiento en la Antártida no se debe al pequeño espacio habitable sino a la imposibilidad de abandonar la estación y el grupo”(19), la multiculturalidad en estancias de largo plazo, la monotonía e incluso la modificación de los ciclos circadianos “La exposición inapropiada o ausente a un ciclo de luz-oscuridad de 24 horas causa una desalineación del tiempo de sueño y vigilia en relación con el marcapasos circadiano cuando el tiempo de sueño no cambia, lo que resulta en interrupciones en la calidad y duración del sueño, rendimiento deficiente y sistemas metabólicos y endocrinos interrumpidos”(20), dado la variación de periodos de luz o ausencia de luz prolongados que se han reportado no solamente en estancias largas, sino en viajes en barco y campamentos cortos. En los periodos de invierno hay ausencia de luz prolongada durante el viaje en barco y en la misma estancia, aun cuando los espacios están dotados de luz artificial, los niveles de melatonina se aumentan como respuesta a la reducción de luz natural, “la secreción de melatonina está regulada por el núcleo supraquiasmático y estimulada por una incidencia reducida de luz”(17) ; adicionalmente, el cortisol al ser una hormona que conlleva un ritmo circadiano, también se ha visto disminuido en horas de la mañana con la ausencia de entrada fótica natural. “En este sentido, cabe destacar que la concentración de cortisol solo se redujo por la mañana, pero no por la noche, lo que llevó a una reducción en la amplitud del cortisol. Las alteraciones del ritmo circadiano se han asociado con deficiencias cognitivas y de aprendizaje”(17) , parámetros que permiten distinguir la disminución en las tareas

operativas de los expedicionarios. Así mismo, el cortisol como indicador de estrés al verse reducido, denota una posibilidad de aclimatación al ambiente y al confinamiento, esto debido a la relación realizada de niveles de cortisol con evaluaciones psicológicas de estrés percibido en la que se encontró que "el aislamiento y el confinamiento en la Antártida pueden resultar en efectos "salutogénicos" debido al mayor sentido de autosuficiencia y crecimiento personal"(17).

En complemento, otro elemento que se ve afectado por la disminución prolongada de luz durante el invierno es la disminución en la síntesis de vitamina D, fundamental en la homeostasis del calcio, como consecuencia una disminución en la densidad ósea de las tripulaciones; aunque se ha propuesto la suplementación de vitamina D en la dieta, otro de los elementos que afecta este equilibrio ha sido el exceso de consumo de sodio, debido a que los alimentos disponibles son enlatados y con facilidad para su conservación, generan un aumento en la excreción renal de calcio, contribuyendo a la pérdida ósea (19); aunque esta variable es realmente análoga con lo que ocurre en las expediciones espaciales, las investigaciones no denotan una alteración irreversible o poco controlable con la simple suplementación de la vitamina D y su relación con la homeostasis del calcio.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar la influencia del ejercicio físico en los efectos fisiológicos cardiovasculares y musculares que se presentan en los expedicionarios Antárticos.

### **2.2 Objetivos específicos**

Caracterizar los principales tipos de actividades antárticas descritos en el contexto de actividad física.

Describir los efectos fisiológicos en el sistema cardiovascular y muscular durante la exposición al ambiente Antártico.

Identificar en la literatura, la evidencia científica que relacione el efecto del ejercicio físico en expedicionarios Antárticos.

Definir los efectos fisiológicos del ejercicio físico a nivel cardiovascular y muscular que permitan potencializar el rendimiento de los expedicionarios Antárticos que desarrollan actividades de campo y actividades en base.



## 3. Metodología

### 3.1 Protocolo y registro

El protocolo pasó por un proceso de aprobación y registro por parte del comité asesor del programa de maestría en fisiología de la facultad de medicina de la Universidad Nacional de Colombia. Posteriormente un evaluador experto fue el encargado de hacer la revisión y en una escala estandarizada calificar el proyecto como aprobado, aprobado con modificaciones o desaprobado. El protocolo final fue registrado en “The Open Science Framework” (OSF) el 3 de marzo del 2024.

### 3.2 Tipo de investigación

El presente trabajo se enmarca en un tipo de investigación secundaria de la literatura, una revisión de alcance tipo scoping review siguiendo el manual PRISMA- ScR una extensión para scoping review(21).

### 3.3 Pregunta de investigación

¿Cuáles son los efectos fisiológicos cardiovasculares y músculo esqueléticos del ejercicio físico en expedicionarios Antárticos?

### 3.4 Análisis PCC

La pregunta de investigación se planteó basado en el análisis de preguntas PCC.

**Tabla 1.** Análisis población, contexto y concepto PCC de la pregunta de investigación.

PCC	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
POBLACIÓN	Expedicionarios Antárticos	Población civil y militar encargada de investigación

		y misiones en espacio Antártico
<b>CONTEXTO</b>	Ejercicio físico	Las contramedidas utilizadas, antes, durante y después de una misión antártica
<b>CONCEPTO</b>	Efectos fisiológicos cardiovasculares y musculares	Resultados sobre los efectos fisiológicos del sistema músculo esquelético y del sistema cardiovascular que se evidencian del ejercicio durante y después de una expedición antártica

### 3.5 Criterios de inclusión de estudios

- Artículos de tipo ensayos clínicos aleatorizados, estudios observacionales, estudios de metodología cualitativa, revisiones sistemáticas.
- Artículos que contengan dos o más criterios de búsqueda.
- Artículos publicados entre el año 2003 hasta el 2024, en idioma español e inglés.
- Estudios en humanos y en murinos.

### 3.6 Criterios de exclusión de estudios

- Artículos que no estén disponibles en texto completo
- Estudios sobre análisis psicológico y/o neurológico
- Estudios que sean de expediciones polares NO antárticas
- Investigaciones que no relacionen el ejercicio físico en las expediciones antárticas
- Estudios de personas con enfermedades
- Artículos relacionados con Covid-19
- Artículos de fisiología en animales, plantas, bacterias y microorganismos

### 3.7 Fuentes de búsqueda

Se realizó la búsqueda en bases de datos especializadas PubMed, Ebsco, Scopus, utilizando los términos de búsqueda y se organizaron en un registro estructurado en la Tabla 3. Para la búsqueda de literatura gris se incluyó una revisión en Google Scholar.

### 3.8 Estrategia de búsqueda

Se utilizaron los términos MESH de búsqueda en las bases de datos junto con sus marcadores booleanos (véase tabla 2).

Los resultados se descargaron en formato csv, ris o bib, se cargaron en la plataforma Rayyan y se realizó el proceso de cribado por coincidencia y de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión establecidos; en primer momento se realizó por título y resumen y posteriormente por texto completo. Se incluyó una búsqueda manual en el buscador Google scholar para minimizar el riesgo de presentar sesgos en la publicación.

**Tabla 2.** Términos Mesh para la búsqueda y marcador booleano

TERMINO MESH	MARCADOR BOOLEANO
Physiology Cardiovascular Physiological Phenomena Human physiological Effects Muscles	AND
Resistance training, Strength Training Endurance training Physical exercise Exercise	AND
Antarctica Isolation Confinement	AND, OR
COVID-19 Disease	NOT

**Tabla 3.** Registro de búsqueda

Base de datos	Estrategia de búsqueda	Número de artículos encontrados	Artículos incluidos	Artículos excluidos después de la lectura	Artículos Repetidos
PubMed					
Ebsco					
Scopus					

Google Scholar					
----------------	--	--	--	--	--

### **3.9 Proceso de recolección de datos de revisión**

Se utilizó un formulario diseñado en Microsoft Excel en el cual se registró la información de cada artículo en lectura completa. Este formato incluyó, Nombre del artículo, cita bibliográfica, población, metodología, medidas de resultado, intervención, resultados, entorno Antártico, duración de la expedición. Los artículos se separaron por bases de datos en diferentes hojas que facilitara el proceso narrativo de los resultados.

### **3.10 Presentación de resultados**

Los resultados se presentaron de una manera narrativa distribuidos en tres capítulos principales que dan cumplimiento a los objetivos de la revisión. Un primer capítulo que caracteriza las expediciones antárticas en el cuál basado en los artículos encontrados, se describen los diferentes escenarios que se pueden presentar en una expedición antártica; el segundo capítulo describe los efectos cardiovasculares y musculares que se hallaron en las investigaciones seleccionadas, es fundamental reconocer que estas investigaciones se encuentran inmersas en un contexto de ejercicio físico; el tercer capítulo narra los resultados de los efectos del ejercicio en la Antártida y busca describir aquellos protocolos utilizados tanto para la evaluación de la aptitud física en la Antártida, como en las metodologías de intervención antes, durante o después de una misión al ambiente extremo. Así mismo, se presentan los resultados de la búsqueda en un diagrama de flujo para scoping review (véase en figura 1).

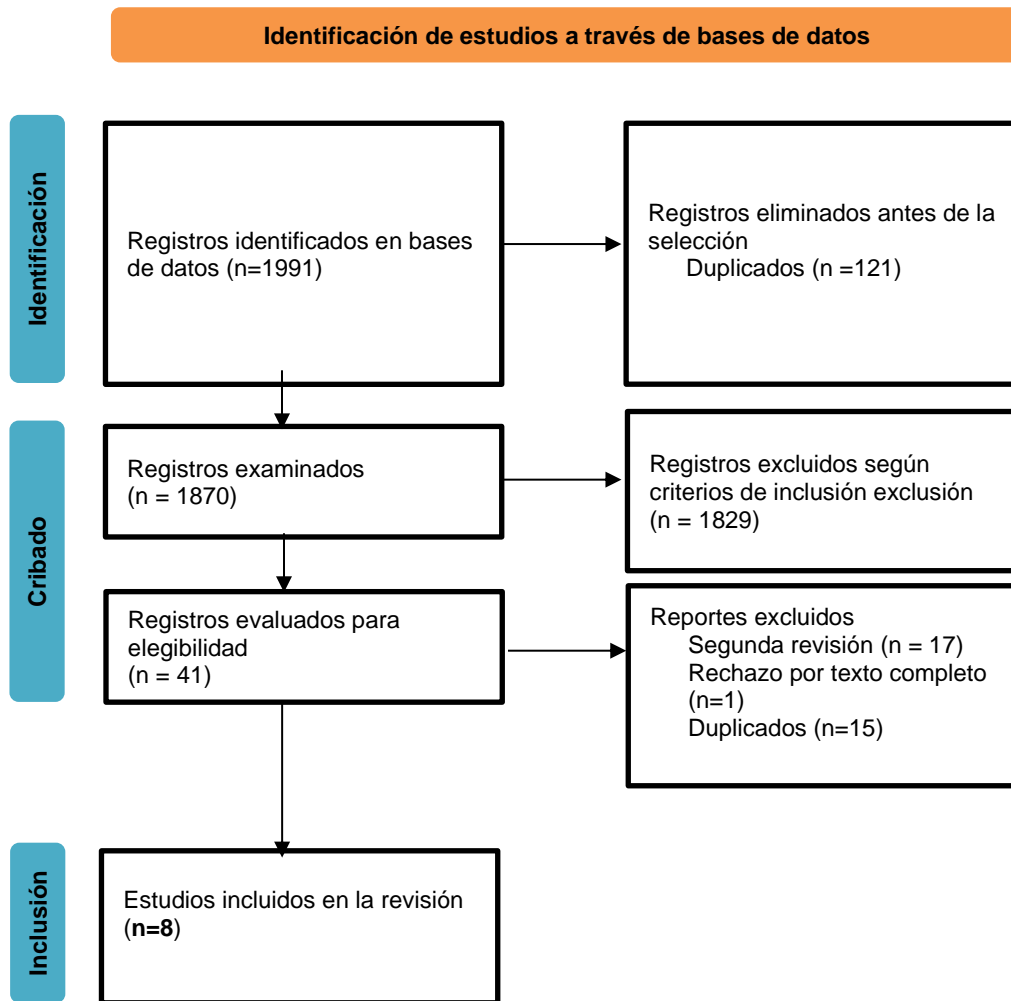


## 4. Resultados

A Marzo del 2024 se recopilaron 1991 artículos de las bases de datos PubMed/MEDLINE (34), SCOPUS (416), EBSCO (13) y Google Scholar (1528). De estos se identificaron y se excluyeron 121 duplicados de la base de datos SCOPUS. Luego se examinaron los artículos por título y resumen de 1870 informes, bajo los criterios descritos anteriormente, se excluyeron 1829 informes, dando como resultado 41 informes. Posteriormente, se identificaron 15 duplicados entre bases de datos y se inició la etapa de lectura completa de los 26 artículos restantes, se hizo un filtro, se excluyeron 17 artículos por criterios de inclusión y exclusión y 1 del que no se obtuvo el texto completo. Finalmente resultó un total de 8 investigaciones que cumplieron con los criterios y fueron utilizadas para la presente revisión.

El proceso de identificación, cribado e inclusión se describe en la Figura 1, basado en el protocolo PRISMA para scoping review.

Figura 1. Diagrama de flujo para scoping review con registro de revisión en base de datos. PRISMA 2020(17).



## 4.1 Características de resultados

Las características de los resultados de esta revisión se presentaron en la tabla 5, que resume el contenido de las 8 investigaciones analizadas. Cada artículo describe el diseño del estudio, la caracterización de los participantes, la caracterización de la intervención, las medidas de resultados, los hallazgos de interés y las observaciones de la revisión.

Tabla 4. Características de resultados

IDENTIFICACION DEL ESTUDIO	DISEÑO DE ESTUDIO	CARACTERIZACIÓN DE LOS PARTICIPANTES	CARACTERIZACIÓN DE LA INTERVENCIÓN	MEDIDAS DE RESULTADOS	HALLAZGOS DE INTERES	OBSERVACIONES
O'Brien et al. 2018 (21)	Estudio longitudinal pruebas pre-post: King's College de Londres 12/12/2012 27/11/2013	N. GI: 5 $\sigma/\rho$ :5/0 E: 28 -54 IMC: 26,36 $\pm$ 3,87	D(s): 40 A.S5-29:2500m A.S8:2824m S.11. campamento de invierno a 2752m S.28: inicio descenso A.S32; 1367m hasta S40	<b>MEDICIONES DURANTE EXPEDICIÓN</b> <u>Ingesta dietética y actividad</u> (ligera/pesada) SpO2 en ejercicio moderado <b>MEDICIONES PRE Y POST EXPEDICIÓN</b> <u>Composición corporal</u> BMD, DXA <u>Función cardiovascular</u> : PAS, PAD, PAM. <u>Función Pulmonar</u> : CVF, FEV1, FVC, PEF, VEF1/CVF% <u>Pruebas de esfuerzo cardiopulmonar</u> : VO2max cicloergómetro Umbral ventilatorio FC por ECG12 RER Fuerza muscular: CMV	DMO columna vertebral: $\downarrow$ 1,8 ( $\pm$ 0,9)% p=0,035 pre:1,2 g/cm2 post:1,13 g/cm2 Tejido graso: $\downarrow$ 2,1% p=0,015 pre: 20,7% (16 $\pm$ 4,7kg) post:18,6% (14 $\pm$ 3,7kg) Masa Magra: $\uparrow$ 2,1% p=0,015 pre:79,3% post:81,4%  CMV: $\uparrow$ 22Nm P=0,062 pre:204,5 Nm post:226,5 Nm aunque no fue significativa, los valores se acercaron a (p=0,06) VEF1 y FVC NO presenta cambios estadísticamente significativo VEF1/FVC $\downarrow$ pre:68,2 $\pm$ 9,7% post: 62,4 $\pm$ 8,4% p=0,016 PAD, PAS y PAM no tuvieron cambios VO2Max(ml/kg de tejido magro) $\uparrow$ 11,6 $\pm$ 1,9 % pre:50,4 ml/kg de tejido magro post:56,1 ml/kg de tejido magro p=0,0003 RER $\uparrow$ pre:8,85 $\pm$ 0,30 post:9,54 $\pm$ 0,26 p=0,007	Expedición antártica en exposición a condiciones de Hipoxia hipobárica y estancia en campamento
Moraes et al. 2018(23)	Estudio longitudinal descriptivo Pruebas pre (3s) y post (24-72h): Buque polar "Almirante Maximiano" Marina de Brasil (H41)	N. GI: 9 $\sigma/\rho$ :7/2 p:7 $\sigma/\rho$ :5/2 m:2 $\sigma$ Ep:36 $\pm$ 8,0 Em:57,0 $\pm$ 7,1	D(d):24 Campamento Isla Snow en las Islas Shetland del sur (62°43'51,8" S, 61°12'33,1" W) Verano antártico	<b>MEDICIONES PRE Y POST EXPEDICIÓN</b> <u>Aptitud aeróbica en ejercicio</u> VO2max Fcmx VFC RMSSD, NN, NN50, pNN50, HF(0,15-0,40 Hz), LF(0,04-0,15 Hz) BM %grasa, $\Sigma$ pliegues <b>Esfuerzo físico y parámetros fisiológicos durante el campamento</b> X #Pasos FC Bla	%grasa(p): $\downarrow$ pre:29,5 $\pm$ 8,7 post:27,6 $\pm$ 7,44 %grasa(m): $\downarrow$ pre:20,5 $\pm$ 10,1 post:19,9 $\pm$ 9,9 <b>Esfuerzo físico y parámetros fisiológicos durante el campamento</b> X:6,2 $\pm$ 1,9km/día y 130,9 $\pm$ 40,6km/21 días #pasos: 176.261 $\pm$ 46.628 T:35,2 $\pm$ el 25,6% FC:<50% T:33,4 $\pm$ 11,9% FC: 50 y 60% T:22,3 $\pm$ 13,3% FC: 60 y 70% T: 7,7 $\pm$ 5,3% FC: 70 y 80% T: 1,4 $\pm$ 1,0% FC: 80 y 90% No hubo diferencia en BLA Aptitud aeróbica en ejercicio VO2max(m) $\downarrow$ pre:46,6 $\pm$ 4,4 mL x Kg x min post:40 mL x Kg x min FC7ªetapa(m) $\uparrow$ pre:120 Lpm $\pm$ 1 post:146 $\pm$ 2 Lpm FCreposito: $\uparrow$ ES=1,64 pre:54,37 $\pm$ 6,47 lpm post:62,45 $\pm$ 2,54 lpm VO2max(p) $\uparrow$ 5,9 $\pm$ 6,4% P = 0,043 pre:37,9 $\pm$ 4,1 mL x Kg x min post:40 $\pm$ 4 mL x Kg x min FC7ªetapa(p) $\downarrow$ P = 0,012 pre:175 $\pm$ 8 Lpm post:166 $\pm$ 13 Lpm <b>VFC</b> NN50%(m) $\downarrow$ : ES=0,75 pre: 23,50 $\pm$ 33,23 post: 5,50 $\pm$ 7,78 PNN50%(m) $\downarrow$ ES=0,77 pre: 10,15 $\pm$ 14,35 post: 2,14 $\pm$ 3,03 LF $\downarrow$ (p) p=0,038 pre: 431,20 $\pm$ 180,94 post: 230,17 $\pm$ 200,41 LF/HF (p) $\downarrow$ P=0,011 pre:705,60 $\pm$ 239,10 post:454,83 $\pm$ 245,87	Se diferenciaron roles de investigadores (paleontólogos) y montañistas debido a su condición física previa. Se dividieron en roles para generar homogeneidad en el análisis de los resultados.
Moraes et al. 2020 (13)	Estudio longitudinal descriptivo	N. GI: 10 $\sigma/\rho$ :7/3 E: 40 $\pm$ 11 MC:81,7 $\pm$ 23 kg	D(d):50 B:26 C:24 "Almirante Maximiano" Marina de Brasil (H41)/ Isla Snow Islas Shetland del Sur (62°43'51.8" S, 61°12'33.1" O)	<b>Evaluación Antropométrica</b> $\Sigma$ pliegues <b>VFC</b> RMSSD, PNN50%, NN50, LF, HF y LF/HF	<b>Etapa Barco VFC</b> RMSSD(d2)24,2 $\pm$ 5,7 ms $\downarrow$ p = 0,03 RMSSD(d16)16,9 $\pm$ 5,4 ms $\uparrow$ RMSSD(d26) 23,2 $\pm$ 5,2ms PNN50%, NN50 no tuvieron cambios estadísticamente significativos HF(d2) 266 $\pm$ 103ms $^2$ HF(d16) 139 $\pm$ 145ms $^2$ $\uparrow$ p = 0,04 HF(d26) 239 $\pm$ 119ms $^2$	La actividad de campo realizada fue prospección de fósiles

			Verano antártico Días de prueba B:(2,16,26) y C:(4,11,23)		LF/HF(d2) 1,5±0,6 ↑ LF/HF(d16) 3,6±2,5 ↓ LF/HF(d16) 1,6±0,7 p=0,03  En la <b>etapa de campamento</b> no hubo ningún cambio importante en laVFC	
Moraes et al. 2022 (26)	Informe de Caso, enfoque experimental	N. GI: 60 ♂/♀:34/26 ♂A:10 E:32,3 ± 9,5 ♂C:10 E:29,6 ± 7,8 ♂PN:14 E:37,3 ± 4,6 ♀A:18 E:28,5 ± 4,3 ♀C:10 E: 29,5 ± 7,5 IMC:	Preparación a los participantes del Programa Antártico Brasileño (PAB) Marina brasileña Entrenamiento teórico-práctico 1 Semana	<b>Descripción de expediciones:</b> Barcos polares Campamentos de verano Estaciones de investigación	<b>Campamento de verano:</b> Mov. Caminatas y desplazamientos D: semanas a tres meses ICE: aislamiento, ambiente extremo Factores estresantes ambientales: Frío, caminata en superficies como cubierta de hielo, grietas, terreno rocoso, periodos de luz 24 horas Efectos fisiológicos: deshidratación, regulación circadiana, radiación prolongada con exposición alta en piel y ojos dada la reflexión de la luz sobre el hielo Actividad física: desplazamiento de trabajo de campo <b>Barcos polares</b> Buques rompehielos Mov: limitado ICE: confinamiento Factores estresantes ambientales: poca luz, ruido, vibración y equilibrio Efectos fisiológicos: somnolencia, apatía y depresión leve, baja actividad física <b>Estaciones de investigación:</b> ICE: confinamiento, condiciones controladas, mayor confort, T20-25°C D: verano e invierno Factores estresantes ambientales: convivencia, intercambio cultural, incertidumbre, seguridad, accesibilidad	El estudio de caso consistió en una evaluación de factores de ánimo, sin embargo, en la revisión es utilizado principalmente por su riqueza descriptiva en el capítulo de caracterización de misiones antárticas.
Balakrishnan et al. 2020 (18)	Diseño y validación de un módulo de yoga basado en la literatura	N. E:30 E: 36,3 ± 4,17 años Exp: 12,3 años	Diseño y validación de un módulo de yoga basado en Yoga Sutras de Patanjali, Hatha Yoga Pradipika, Shiva Samhitha, Gheranda Samhitha, HathaathnavaliB hagavad Gita, Upanishads, Yoga Vashishta y Yogui Sukshma Vyayama	<b>Evaluación del módulo</b> escala de 1 a 5 (1 nada útil, 2 poco útil, 3 moderadamente útil, 4 muy útil, 5 extremadamente útil) Validez de contenido CVR : Lawshe	El módulo de Yoga que se diseñó consistió en posturas con movimientos lentos y conciencia de la respiración, ejercicios de relajación, suryanamaskara, asana, praëayama, relajación y nadanusandhana. La duración de toda la práctica es de 1 h. 30 expertos validaron el módulo. Se excluyó un viparitakarani de práctica con CVR <0,6 El CVR promedio para todo el módulo de Yoga fue de 0,89	una investigación que genera una propuesta y valida una actividad de Yoga como contramedida de las condiciones ICE de la Antártida
O'Leary et al. 2019 (24)	Estudio longitudinal descriptivo Pruebas pre: 39 d Pruebas post: 15 d	N. GI: 6 ♂/♀:0/6 E: 32 ± 3 T: 1,72± 0,07m P:72,8± 4kg	D(d):61 Expedición de esquí arrastrando trineos 80kg a través de 1700km de la Antártida.	<b>Recambio óseo</b> aDMO (mg HA·cm <sup>3</sup> ) DXA DMO brazos, piernas, tronco, costillas, pelvis, columna vDMO(mg HA·cm <sup>3</sup> ), tibia, Volumen trabecular y cortical fracción de volumen óseo trabecular (%), área trabecular (mm <sup>2</sup> ), área cortical (mm <sup>2</sup> ), grosor cortical (mm), grosor trabecular (mm), número trabecular (mm <sup>-1</sup> ), separación trabecular (mm), porosidad cortical (%) y diámetro	aDMO ↓ tronco P = 0,046 pre: -0,05 post: -0,01 ↓ columna P = 0,046 pre: -0,07 post: -0,00 ↓ costillas P = 0,007 pre: -0,07 post: -0,02 DMO brazos, piernas, pelvis y cuerpo entero no tuvieron cambios significativos en comparación pre y post expedición.	Una investigación que evaluó únicamente mujeres

				de poro cortical (mm) <b>Marcadores bioquímicos del recambio óseo</b> BALP, P1NP, CTX, 25 hidroxivitamina D, magnesio, fosfato, calcio, albúmina		
Parent et al. 2018 (25)	Estudio longitudinal descriptivo Mediciones pre y post: Canadá (Quebec-Montreal) Pre expedición: Ushuaia-Argentina	N. GI: 6 $\sigma/\rho$ :3/3 E: 25±3 IMC: 23,5±2,8	D(d): 30 Amax:2200m Aplateau:1400m T: -20°C a -40°C Travesía en esquí carga: 100kg Actividad diaria: 10-15 horas Luz solar:12 horas Verano Antártico	<b>Medidas antropométricas:</b> Grasa corporal <b>Evaluación de la aptitud muscular:</b> Fuerza de agarre por dinamometría Prueba de suspensión en barra Sentadilla Isométrica Fuerza 6 RM Dominadas con lastrado <b>Evaluación de la capacidad aeróbica</b> Prueba aeróbica máxima específica SMAT: VE,VO2,FC,PE,Rmax Velocidad aeróbica máxima en carrera MARS: VE,VO2,FC, FC, RMax	Peso magro (w) $\uparrow$ p=0,040 pre: 45,4 ±4,4 kg post: 47,1 ±4,1 kg %graso(g) $\downarrow$ p=0,014 pre:22±7,7% post 20,1±7,9% En Hombres especialmente no hubo cambios estadísticamente significativos 6RM (pierna izq) $\uparrow$ p=0,031 pre:295±110Lb post: 364±135 Lb SMAT Vo2max $\uparrow$ p= 0,027 pre:40,8±4,2 ml/kg/min post:46,9±7,4 ml/kg/min %VO2 en VT $\uparrow$ p=0,003 pre:65,3±6,2% post:77,2±8,5 % VO2 en VT $\uparrow$ P=0,027 pre:29,6±2,3 ml/kg/min post:35,8±2,9 ml/kg/min <b>MARS</b> VE pico $\downarrow$ p=0,037 pre:130,3±18,6 L/min post:119,5±15,4 Aptitud muscular y cardiorrespiratorio frio/calor VO2etapa2 (frio) $\downarrow$ p=0,027 pre:21,5±1,8 ml/kg/min post:17,7±3,4 ml/kg/min FC $\downarrow$ p= 0,025 pre:109±5ppm post:102±8ppm VO2(última etapa, frio) $\downarrow$ p=0,042 pre:24,5±3ml/kg/min post:21,0±4,3 ml/kg/min	Las pruebas de aptitud física se realizaron en dos ambientes, uno en temperatura controlada 20° ±1° C y otro en temperatura fría -1°±-8°C.
Simpson, A., & Maynard, V. 2012 (30)	Estudio observacion al longitudinal prospectivo Pruebas cada mes	N. GI: 21 $\sigma/\rho$ :18/3 E: 30,6±6,05 IMC: 25,2±3,29 %graso: 20,3±6,66 VO2max: 60,2±9,26 ml/kg/min	D(a):1 Estación de investigación Rothera Muestra heterogénea Invierno ene 2007 a enero 2008	<b>Composición corporal</b> Peso corporal Tejido graso <b>Actividad</b> #pasos <b>Aptitud aeróbica</b> VO2max indirecto	Peso corporal: p=0,012 Ene07 84 kg $\downarrow$ Feb07 83,1 kg $\uparrow$ May-jun-jul07 85,9 kg $\downarrow$ 82,5 kg hasta Dic07 Grasa corporal p=0,049 Ene07 23,4% $\uparrow$ hasta jul07 24,6% $\downarrow$ hasta Dic07 22,4% VO2max No tuvo fluctuaciones en el año y no hubo cambios estadísticamente significativos. Actividad Invierno 9.300 pasos/día $\uparrow$ verano 12.900 pasos/día $\downarrow$ Dic.9.400 pasos/día Relación aptitud aeróbica/grasa corporal alta correlación negativa r=-0,779 a -0,954; n=8 a 18; p=0,000 a 0,001	La muestra fue heterogénea por los roles que llevaban a cabo cada sujeto (comandante de base, chef, meteorólogo, médico, carpintero, electricista, mecánico, entre otros).

N. Número de sujetos, GI grupo intervención,  $\sigma/\rho$ : Categorización por género, E: edad, IMC; índice de masa corporal; T: talla, P: Peso; (p): paleontólogos, (m):montañistas, (w):mujeres; B:Barco C:campo;X: Distancia ; BM: masa corporal; D(d):duración en días, D(s): duración en semanas, D(a): duración en años; Exp: experiencia en años;  $\uparrow$  aumento;  $\downarrow$  disminución.

Adicionalmente, los resultados se recopilaron de forma narrativa en tres capítulos principales que destacan los resultados de cada uno de los estudios incluidos en esta revisión.

## 4.2 Caracterización de misiones antárticas

La exploración en la Antártida ha sido una herramienta que política y científicamente se ha utilizado bajo parámetros reglamentados en los acuerdos internacionales Antárticos que limitan y cuidan el entorno; el cual, debido a la analogía con las misiones espaciales, favorece el entendimiento del ser humano por medio de la investigación de grandes temáticas; en este caso desde el abordaje de los efectos fisiológicos del ser humano bajo condiciones extremas. Estos entornos, son inherentemente estresantes y se caracterizan por una variedad de factores físicos y psicosociales que incluyen, entre otros, el entorno cápsula, el aislamiento, las tensiones sociales, el aburrimiento, la monotonía y el peligro (22), los cuales responden a la analogía de los vuelos espaciales tripulados a la Estación Espacial Internacional (ISS: International Space Station), a la Luna, o en un futuro a Marte (23).

Las personas que trabajan en misiones antárticas se exponen a un ambiente muy frío, con temperaturas que caen entre  $-60^{\circ}\text{C}$  hasta  $-70^{\circ}\text{C}$  en verano (8,24), “grandes altitudes que generan una exposición a hipoxia hipobárica (4892msm para el monte Vinson)”(8), diferentes fotoperiodos es decir ciclos de luz y oscuridad alterados, baja humedad relativa, fuertes campos magnéticos, alta radiación UV, fuertes vientos entre 30 a 40 nudos que imposibilitan salir a actividades de campo, largas jornadas de trabajo y aislamiento social y geográfico, que se traducen en factores psicológicos estresantes (25).

Este ambiente, convierte a la Antártida en un laboratorio natural ideal para estudiar diversas respuestas humanas. Este laboratorio, puede ser ajustado bajo condiciones controladas según las necesidades de cada expedición, lo que permite identificar los roles de los expedicionarios y también las respuestas en diferentes espacios en una estadía en la Antártida, que dependiendo del tipo de investigación, el protocolo y también de las colaboraciones entre países pertenecientes al acuerdo Antártico, podrán generar una gran diversidad de información en actividades científicas, lugar de establecimiento, condiciones ambientales según altitud, temperatura, luminosidad, estación, entre otras.

Los Programas Antárticos Nacionales (NAP: National Antarctic Programs), llevan a cabo las expediciones con personal científico, personal de apoyo, militares, profesionales en montañismo e incluso turismo de pago. Dependiendo del objetivo de la misión y del rol que desempeña allí se pueden identificar elementos fundamentales que son tenidos en cuenta en el estudio del ser humano desde la fisiología.

Por ejemplo, un grupo de expedicionarios que realizaron actividades de campo de prospección de fósiles registró que, durante 21 días, 9 voluntarios entre montañistas e investigadores recorrieron a  $6,2 \pm 1,9$  km por día y un total de  $130,9 \pm 40,6$  km, utilizando “ropa pesada y aislante que oscila entre 6kg a 9 kg” (9) y caminando sobre terrenos accidentados en nieve o roca (9). Adicionalmente, el promedio de pasos en toda la expedición fue de  $176.261 \pm 46.628$  (requerimiento diario para ser físicamente activo OMS 10.000 pasos).

Así mismo, Moraes et al.(17) realizaron una expedición de 10 brasileros que estuvieron 26 días a bordo del barco “Almirante Maximiano”, registrando un valor de  $1948 \pm 1362$  pasos, que se clasifica como un estilo de vida sedentario; quienes posteriormente se clasificaron como físicamente activos, en su estadía 21 días posteriores en campamento, registrando  $8471 \pm 2164$  pasos quienes recorrieron  $6,2 \pm 1,9$  km por día y un total de  $130,9 \pm 40,6$  km en los 21 días.

Por su parte, O’Leary et al.(26) reportó una misión de 6 mujeres de edad media de  $32 \pm 3$  altura  $1,72 \pm 0,07$ m peso  $72,8 \pm 4$ kg; quienes hicieron parte de una expedición que implicó el transporte de trineos de 80 kg a lo largo de 1700km de la Antártida completándose en 61 días; así como, Parent et al.(27) realizaron una expedición similar para 6 expedicionarios (3 hombre y 3 mujeres) quienes iniciaron cruzando en vela por mar 1700km, luego 30 días en la Antártida en el Forbidden Plateau a una altitud máxima de 2200 msnm y el altiplano registrado de 1400 msnm, se realizó una travesía en esquí y arrastre de trineos de aproximadamente 100 kg incluyendo equipaje, que representó de 10 a 15 horas por día con 12 horas de luz solar.

En términos de temperatura ambiental, Fernández et al.(25) reportó una expedición que realizaron 21 varones entre 22 y 47 años quienes navegaron por las aguas antárticas del estrecho de Bransfield y el mar de Bellinghausen, al sur del círculo polar Antártico, expuestos a temperaturas entre  $-8^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$  con sensación térmica hasta de  $-35^{\circ}\text{C}$  (25).

A partir de esto, reconocer la diferencia en las actividades realizadas, en el rol que se tiene en una misión, del lugar en el cual se realiza la estadía, marcará la diferencia en el requerimiento de contramedidas por ejemplo del ejercicio de acuerdo con cada población.

En concordancia, el personal de las NAP permanece en diferentes entornos ICE por sus siglas en inglés (isolated, confined and extreme environments); tales como: barcos, estaciones de investigación y campamentos científicos de verano. Estos varían la duración de expediciones, las cuales podrían ser temporales (semanas a tres meses) o hasta un año o más en temporadas invernales expuestos a condiciones más análogas a la ISS (7).

Las situaciones o entornos que configuran ambientes construidos incluyendo, los barcos, los campamentos y las estaciones de investigación, se describen a continuación.

Los barcos principalmente tipo buques rompehielos, son lugares que restringen el movimiento por los espacios limitados, siendo naturalmente un espacio de confinamiento y limitaciones físicas. En el barco, se espera lidiar con factores estresantes ambientales, como poca luz, ruido, vibración y equilibrio, con el consiguiente mareo (17), (caracterizado por somnolencia, apatía y depresión leve) (7). Es un ambiente que genera un efecto directo en la salud mental y física de la tripulación; incluso se ha registrado menos actividad (17) y una dieta en alimentos no tan frescos en comparación con la estancia en puerto (25).

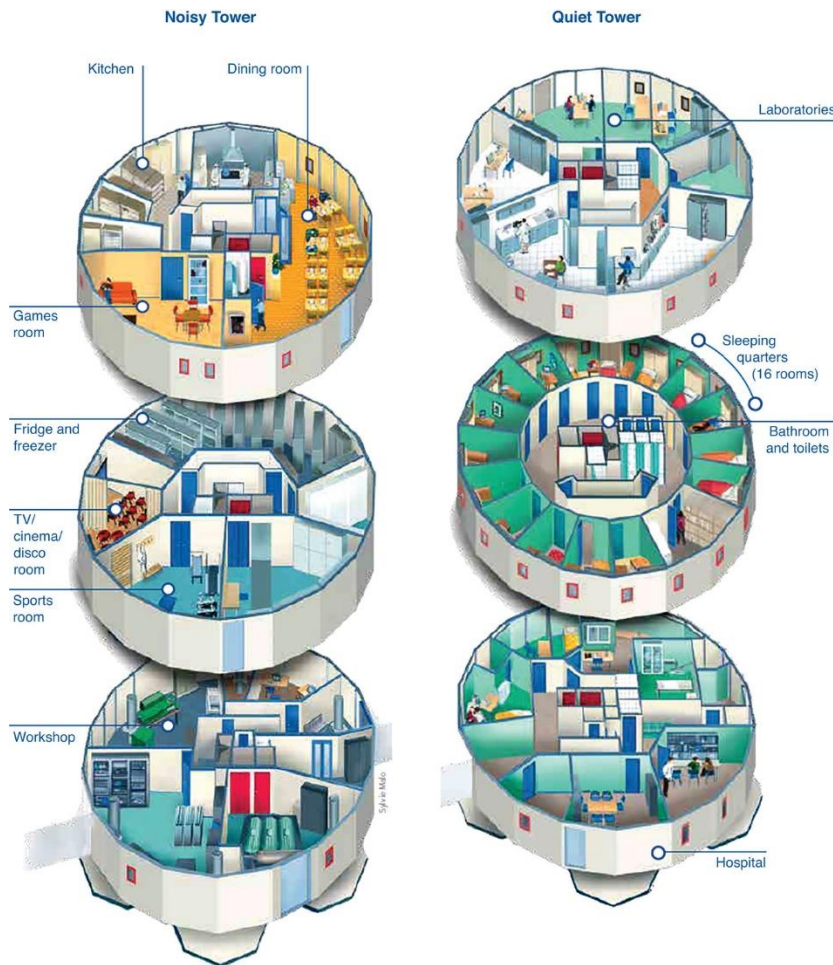
Los campamentos de verano plantean los riesgos físicos más importantes del ICE debido al frío, como hipotermia y congelación. Además, el frío supone un riesgo de deshidratación, intensificada por la sudoración durante el esfuerzo físico en los desplazamientos de trabajo de campo (7). Los desplazamientos generan peligros extremos debido a la variedad en superficies como cubierta de hielo, grietas, terreno rocoso e incluso desprendimiento de rocas. El esfuerzo físico puede resultar en un alto nivel, en mayor medida para personas no entrenadas (9). Estos campamentos al realizarse en temporada de verano austral, expone a los expedicionarios a periodos de luz de 24 horas lo que tiene influencia en parámetros fisiológicos relacionados con la regulación circadiana; así mismo se presenta, exposición a radiación prolongada, con exposición alta en piel y ojos dada la reflexión de la luz sobre el hielo (5,9).



---

Las estaciones de investigación en la Antártida son espacios con situaciones ICE más controlados, con mayor confort térmico al interior de la estación (20-25°C) debido a su operación continua. Son lugares que varían en su implementación según el grado de desarrollo tecnológico, tamaño, forma, ecología, entre otros. También se diferencian por su locación, muchas de estas bases se encuentran al nivel del mar, rodeadas de un entorno amigable, por ejemplo, acceso al gimnasio, a una iglesia, a otras estaciones cercanas, convirtiéndolo en un lugar amigable en una estancia extendida. Sin embargo, entre los elementos comunes se reconocen que las estaciones albergan a investigadores, militares y expedicionarios durante el verano y/o el invierno; es un ambiente que implica convivencia e intercambio cultural en muchas ocasiones por la diversidad en las nacionalidades de los expedicionarios ; por lo tanto, el confinamiento es una característica principal, el aislamiento del territorio de origen y en algunas ocasiones la incertidumbre por las condiciones externas que no permiten salir a exploraciones en campo o definir la fecha de retorno; así como la limitación ante una evacuación de emergencia, principalmente en invierno (7).

**Ilustración 1.** Representación esquemática de la estación de investigación Concordia (Agencia Espacial Europea) Van Ombergen, 2021 (28).



La exposición a condiciones ICE varía de acuerdo con el lugar de estancia de las expediciones y de los roles que tenga el expedicionario, como previamente se ha revisado. Sin embargo, las características del entorno también varían por la ubicación de las estaciones, su infraestructura, las relaciones entre países colaboradores, el tipo de investigaciones que desarrollen, entre muchos más; un ejemplo importante a resaltar es la estación de investigación Concordia, que se encuentra ubicada a una gran distancia dentro del continente Antártico, es una base Italiana, que alberga hasta 16 personas incluyendo gerente técnico, un cocinero, un médico, un plomero y otros técnicos, su temperatura media ambiental es de  $-51^{\circ}\text{C}$  y puede llegar hasta  $-80^{\circ}\text{C}$  en invierno. Dada su ubicación remota y de difícil acceso, es ideal para simular actividades extra vehiculares (EVA) que

---

implican el uso de trajes de alta seguridad, así como protocolos de telemedicina y ensayo de sensores fisiológicos entre otros dispositivos (28).

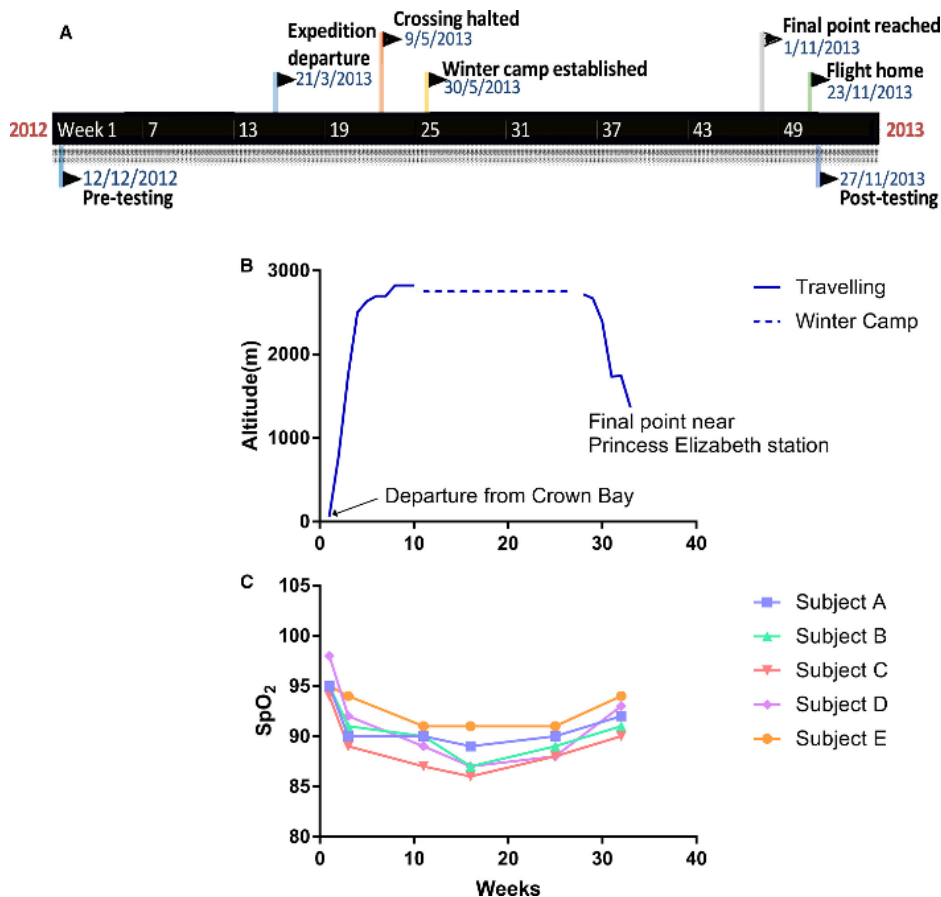
### **4.3 Efectos fisiológicos en el sistema cardiovascular y muscular en Antártida**

Gran parte de las investigaciones sobre fisiología humana en la Antártida evalúan parámetros neuroendocrinos, en los cuales se relacionan directamente los efectos de las bajas temperaturas con la calidad del sueño, la capacidad de aclimatación, el rendimiento cognitivo y el estado emocional, a partir de la medición de ciertos marcadores bioquímicos, hormonales en saliva, sangre y orina; así como el registro en diarios de campo y cuestionarios de reporte que permite de forma accesible la exploración a algunas de las condiciones ICE.

En esa búsqueda implacable de identificar la manera en la que el ser humano se aclimata a los ambientes extremos se han relacionado algunos efectos cardiovasculares y respiratorios; en un inicio se hipotetizaba sobre sus efectos dada la exposición al ambiente hipóxico, pero es importante aclarar que muchas de las bases se encuentran a nivel del mar, e incluso algunas de esas expediciones se realizan en barco, por lo tanto, no es una variable que sea común en las investigaciones antárticas.

La investigación desarrollada por O'Brien et al.(24) en contexto de exposición a ambiente hipóxico, en 5 hombres de 28 a 54 años, quienes fueron evaluados antes y después de una expedición en la Antártida en un intento de travesía invernal de 33 semanas, en la cual, durante las semanas 5 a 29 pasaron en altura por encima de los 2500msnm hasta la más alta con 2824 m en la semana 8 (véase en la Ilustración 2.)

**Ilustración 2.** Descripción de la expedición de 33 semanas (A) , los cambios de altimetría (B) y los cambios de la saturación de presión de oxígeno (SpO2) (C). O’Brien 2018. (24)



Los evaluados, durante 24 semanas estuvieron en una altitud de 2500 msnm hasta una altitud máxima de 2824 msnm posterior a un campamento establecido por dificultad ambiental, en la semana 28 realizaron el descenso hasta una altitud de 1700msnm.

Intermitentemente, se realizó una prueba de 18 min en un step de 21,5 cm con metrónomo al final de 160ppm, en la cual se evaluó SpO2 en ejercicio, medido en el dedo índice al final de la prueba. Como resultado, se observó en los evaluados, una disminución progresiva de SpO2 (véase en Ilustración 2) relacionada con el aumento de la altura, de “95.4 ± 1.5% en altitud de 58 msnm a 89.4 ± 1.5 % en altitud de 2752 msnm, manteniéndose en 89.2± 1.6% después de 14 semanas a 2752 msnm y aumentando a 92 ± 1.6 % al descender a 1700 msnm” (24).

De igual manera, O’Brien et al.(24), realizaron mediciones antes y después de la expedición de la densidad de mineral óseo (DMO) de la columna vertebral y de todo el

cuerpo por medio de rayos X (DXA); la función cardiovascular (PAD,PAS,PAM) en reposo posterior a 15 minutos en posición supino utilizando un monitor de presión arterial (finanometro pro®); la función pulmonar ( PEF, FVC, FEV1, VEF1/FVC%) por medio de un analizador de gases oxycon pro®, realizando una inspiración máxima y expiración total en posición de sentados y erguidos; la composición corporal por medio de un estadiómetro de balanza de equilibrio, el %magro y %graso por RX. Adicionalmente se realizaron pruebas de esfuerzo cardiopulmonar para determinar el VO<sub>2</sub>max por medio de una prueba de esfuerzo maximal en un cicloergómetro durante 3 minutos a 50W y posteriormente aumentando 1 a 2 W cada 3 a 5 sg hasta el fallo alrededor de los 10 a 12 minutos de prueba, así mismo, se monitoreó la FC con ECG12; finalmente se evaluó la fuerza muscular máxima por medio de contracción voluntaria máxima (MVC) en los extensores de la rodilla de la lateralidad dominante por medio de un dinamómetro aislando cadera y hombros en el movimiento, que consistió en realizar 3 contracciones máximas manteniendo de 3 a 4 sg la contracción y luego un descanso de 1 minuto entre repetición. Se realizó un análisis estadístico por medio de la prueba t- student pareada y se asumió una distribución gaussiana, identificando diferencias en las variables antes y después de la expedición.

Los resultados asociados con las respuestas fisiológicas musculo esqueléticas, permitieron observar una disminución del  $1,8 \pm 0,9\%$   $p=0,035$  ( $P < 0,05$ ) en la DMO de la columna vertebral, con un valor pre expedición de  $1,2 \text{ g/cm}^2$  a un valor post expedición de  $1,13 \text{ g/cm}^2$ , acompañado de una disminución del 2,1% de tejido graso, pre expedición 20,7% a post expedición 18,6%  $p=0,015$ , equivalente a un peso graso pre  $16 \pm 4,7 \text{ kg}$  a post  $14 \pm 3,7 \text{ kg}$  con un valor de significancia de  $p=0,034$  y aumento del 2,1% de masa magra, pre expedición de 79,3% y en post expedición de 81,4% con un valor en  $p=0,015$ , mostrando significancia en los resultados ( $p < 0,05$ ), estos valores no se repercuten en el peso corporal, ya que el aumento de la masa magra fue proporcional a la disminución de la masa grasa. En concordancia a estos resultados, las pruebas de esfuerzo, especialmente la evaluación de fuerza muscular máxima reveló un aumento de 22Nm, con valores pre expedición de 204,5 Nm, a un valor de 226,5 Nm post expedición  $p=0,062$ , aunque el cambio no fue significativo los valores se acercaron a la significancia ( $p=0,06$ ), evidenciando una ganancia de fuerza, junto con la ganancia de masa magra, lo cual podría estar relacionado dado el estímulo de entrenamiento debido a las características de la expedición; sin embargo, O'Brien et al.(24), refieren poca relación causal dado que los

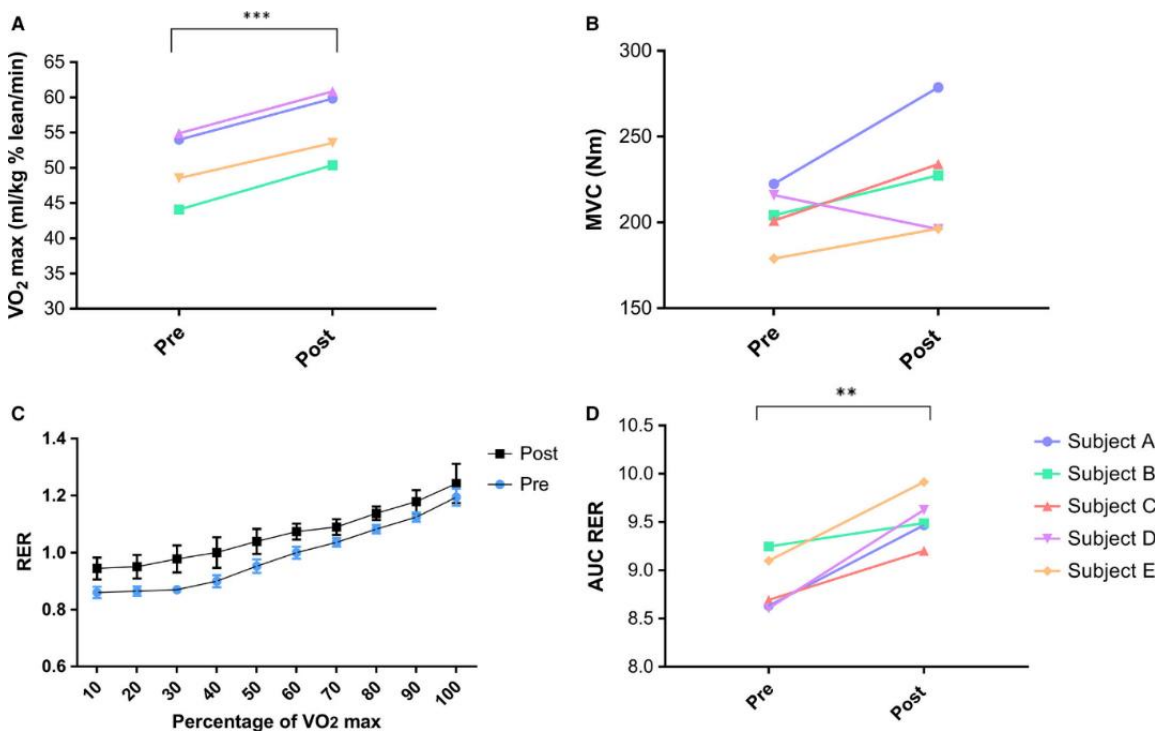
primeros 11 días fueron en los que se tuvo un esfuerzo físico importante y posteriormente se disminuyó, tampoco es posible relacionarlo con la exposición a la hipoxia ya que las pruebas las realizaron a nivel del mar y la exposición fue algunos días previos a la evaluación.

Una medida novedosa fue resaltada en este estudio con la disminución de DMO en la columna vertebral, un evento que potencializa el riesgo a sufrir fracturas y poner en riesgo la seguridad de la misión; si bien, en el estudio no se puede adjudicar estos resultados de forma causal, podría encontrarse una asociación con la exposición a hipoxia hipo bórica dada la "regulación del HIF-1 $\alpha$  en los osteoclastos" (24), es decir que a grandes altitudes se reduce la masa ósea y la fuerza; lo cual plantea que los osteocitos del hueso cortical tienen un papel importante en la respuesta esquelética a la hipoxia porque están expuestos a bajas tensiones de oxígeno y tienen capacidades de detección de oxígeno (29); sin embargo, hace falta desarrollar más investigaciones en humanos con mediciones específicas en el sistema muscular y esquelético.

Los cambios antropométricos y funcionales a nivel muscular, no se relacionan directamente con una medida de entrenamiento, ya que las características de la expedición evaluada por O'Brien et al.(24), permiten destacar que fue en los primeros 11 días de travesía en los que se tuvo el mayor estímulo físico y posteriormente la actividad física se disminuyó dado el asentamiento del campamento de invierno y las dificultades del entorno que no permitían realizar actividades de campo. Otras variables estudiadas fueron la función cardiovascular y respiratoria, las mediciones de la función pulmonar respecto al VEF1 o FVC no presenta cambios estadísticamente significativo, sin embargo la FVC previo a la expedición fue de  $6,38 \pm 1,29$  L y post expedición de  $7,11 \pm 1,88$  L con un aumento numérico que aunque no fue significativo ( $p=0,060$ ) permitió generar significancia del VEF1/FVC pre  $68,2 \pm 9,7\%$  y post  $62,4 \pm 8,4\%$  con un valor  $p=0,016$  estadísticamente significativo, aunque el autor del texto no permite relacionar estos resultados con otras variables, podría reconocerse un proceso de aclimatación por la exposición a un ambiente hipóxico o al entrenamiento dadas las características de la expedición.

En cuanto a los parámetros cardiovasculares la PAD, PAS y PAM no tuvieron cambios significativos y tampoco en la frecuencia cardiaca, por lo tanto, no se identifica un riesgo cardiovascular o hemodinámico en expediciones antárticas con estas características; por otra parte, el  $VO_2\text{max}$  corregido al peso magro evidenció en los resultados, un aumento de  $11,6 \pm 1,9 \%$  en  $VO_2\text{máx}$  (ml/kg de tejido magro) el cual pasó de  $50,4$  ml/kg de tejido magro a  $56,1$  ml/kg de tejido magro después de la expedición con una significancia de  $p=0,0003$  ( $P < 0.001$ ), acompañado de un aumento del área bajo la curva (AUC) de la relación de intercambio respiratorio (RER) el cual pre expedición fue de  $8,85 \pm 0,30$  a  $9,54 \pm 0,26$  post expedición con un valor de  $p=0,007$  ( $P < 0.01$ ). El aumento de RER se relacionó con mayor dependencia en el uso de carbohidratos como sustrato energético en ejercicio incremental, las mejoras en  $VO_2\text{max}$  muestra beneficios potenciales de la aclimatación a la exposición hipóxica, resultante del aumento de eritropoyesis y angiogénesis; ya que el ejercicio no fue cuantificado, no fue posible relacionar estos efectos (24). Los cambios en algunos parámetros se representan en la ilustración 3.

**Ilustración 3.** Resultados de los cambios en el  $Vo_2\text{max}$  corregido a % magro (A), contracción máxima voluntaria MVC (B), comportamiento estadístico de RER presentado en percentiles del  $VO_2\text{max}$  (C) y el área bajo la curva (AUC) para RER (D). Se presentan valores por sujeto O'Brien 2018 (24).



El estudio Moraes et al.(17), evaluó a 10 expedicionarios brasileños (7 hombres y 3 mujeres), a través de un estudio descriptivo longitudinal en el cual se dividió en dos etapas, la primera un viaje en barco a la Antártida de 26 días y posteriormente un periodo de 24 días en campo Antártico en trabajos de prospección de fósiles, la expedición duró 50 días en total, el cual se realizó en verano Antártico. Los sujetos fueron evaluados al inicio, a la mitad y al final de cada etapa.

En este estudio, evaluaron antropometría por medio del estudio de pliegues cutáneos con un calibrador; el análisis hormonal en saliva (cortisol, melatonina) manteniendo las muestras congeladas hasta ser procesadas y analizadas, en sangre (TSH y T4) por medio de cinco gotas de sangre en papel de filtro almacenado en un sobre en bolsas de plástico y en orina (aldosterona) recolectada durante 12 h y se almacenó congelada hasta su análisis; la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) se registró en intervalos RR por medio de un monitor de frecuencia cardiaca (Polar® S810i, Polar, Finlandia) en reposo durante 20 minutos, se registraron 10 minutos y se analizaron los últimos 5 minutos de dicho registro, en el análisis de variables se incluyeron medidas en el dominio del tiempo (RMSSD raíz cuadrada de las diferencias cuadráticas medias de los intervalos RR; pNN50% porcentaje de RR consecutivos que discrepan en más de 50ms entre sí; NN el número de diferencias de RR sucesivos de normal a normal; NN50 numero de diferencias de RR sucesivos superiores a 50ms) en el dominio de la frecuencia se analizó (banda de alta frecuencia HF, baja frecuencia LF, LF/HF relación entre banda de baja frecuencia y banda de alta frecuencia).

Adicionalmente, se evaluó el estado de ánimo por medio de un cuestionario con escala (BRUMS) de 24 ítems, evaluando seis dimensiones que no serán relacionados en la presente revisión. En el análisis estadístico utilizaron la prueba Shapiro- Wilk y Levene, la prueba de t-student, ANOVA, pruebas student-Newman-Keuls post hoc, el tamaño del efecto  $d$  de Cohen ES y EE(17).

La relación del sistema nervioso autónomo simpático y parasimpático con la contractilidad del corazón por medio del estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca Moraes et al.(17), evidenció en la primera etapa en la travesía en barco, cambios en el dominio del tiempo de la RMSSD y el en dominio de frecuencia en la HF y la relación LH/HF. En el 2° día la RMSSD fue de  $24,2 \pm 5,7$  ms en el día 16 resultó  $16,9 \pm 5,4$  ms y el día 26 en el que finalizó la etapa de barco fue de  $23,2 \pm 5,2$ ms indicando una disminución del RMSSD al



inicio del viaje y posterior al día 16 un aumento hasta valores cercanos a los iniciales, de acuerdo con el efecto d(ES) de cohen el efecto del día 16 vs el 2° día fue de gran tamaño y dicho cambio fue significativo evidenciado con una  $p= 0,03$  ( $p<0,05$ ). En las medidas de tiempo, la PNN50%, NN50 no tuvieron diferencias estadísticamente significativo, de acuerdo con el efecto d de Cohen los efectos son de tamaño moderado, aunque siguen una dinámica similar a RMSSD del día 2 al 16 hay una leve disminución y del día 16 al 26 se genera aumento leve, sin embargo, no llegan a valores iniciales (véase Gráfica 1)

**Gráfica 1.** Variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) en etapa 1. travesía en barco. \*significancia respecto al día 2 ( $p <0,05$ ) y # significancia respecto al día 16. Moraes et al. 2020 (13)

	2º día	Día 16	Día 26	ANOVA de un factor	Cohen's d 16º vs 2º día	El día 26 vs 16 de Cohen
FC (lpm)	72.2 (15.1)	73.3 (9.4)	70.2 (9.9)	$F = 1,36 P = 0,29$	0.09	0.32
RMSSD (ms)	24.2 (5.7)	16.9 (5.4)	23.2 (5.2) <sup>#</sup>	$F = 4,63 P = 0,03$	1.31 <sup>L</sup>	1.19 <sup>M</sup>
NN50	12.7 (15.9)	4.7 (9.1)	8.6 (6.1)	$F = 0,98 P = 0,40$	0.62 <sup>M</sup>	0.50
pNN50 (%)	5.0 (7.0)	1.4 (2.5)	3.0 (2.1)	$F = 1,12 P = 0,35$	0.68 <sup>M</sup>	0.69 <sup>M</sup>
LF (ms <sup>2</sup> )	401 (180)	327 (199)	339 (149)	$F = 0,12 P = 0,89$	0.39	0.07
HF (ms <sup>2</sup> )	266 (103)	139 (145)	239 (119) #	$F = 3,94 P = 0,04$	1.01 <sup>M</sup>	0.75 <sup>M</sup>
LF/HF	1.5 (0.6)	3.6 (2.5) <sup>*</sup>	1.6 (0.7) #	$F = 4,67 P = 0,03$	1.15 <sup>M</sup>	1.09 <sup>M</sup>

Continuando con los resultados, en el dominio de la frecuencia la banda HF tuvo un aumento significativo desde el día 16 hasta el 26 con un valor en  $p= 0,04$ , indicando en el día 16 se obtuvo  $139 \pm 145$  ms<sup>2</sup> y el día 26 al final de la travesía en barco resultó un valor de  $239 \pm 119$  ms<sup>2</sup>; adicionalmente, la relación LF/HF tuvo un aumento significativo del día 2 con  $1,5 \pm 0,6$  al día 16 con un resultado de  $3,6 \pm 2,5$  y posteriormente el día 26 con una disminución significativa de  $1,6 \pm 0,7$  con un valor de  $p=0,03$ .

Por el contrario, en la etapa 2 en el que se encontraron en campamento, en el dominio de tiempo y frecuencia, no se hallaron diferencias significativas en ninguna de las variables medidas en VFC.

Los resultados de la VFC en la travesía en barco proponen una disminución de la actividad parasimpática del SNA, una reducción en la actividad vagal en el corazón, indicando la dificultad de relajación y recuperación, un predominio de la actividad simpática que podría relacionarse con exposición a estrés; aunque la frecuencia cardiaca no tuvo cambios significativos, la disminución de RMSSD y HF son un indicador claro de una exposición a estrés que el presente estudio no pudo definir como agudo o crónico dada las mediciones de largos periodos temporales, así mismo, coherente a las condiciones de las travesías en barco a la Antártida, aumenta el riesgo a sufrir enfermedades cardiovasculares como hipertensión, arritmias, falla cardiaca y mortalidad por causas cardiovasculares, entre otras; sin embargo, de acuerdo con la tendencia de RMSSD en el dominio del tiempo, HF en el dominio de la frecuencia, se evidenció un proceso de aclimatación en las mediciones cronológicas, tanto, que al final de la primera etapa hubo un retorno a valores iniciales en RMSSD y posteriormente la estadía en campamento Antártico no generó diferencias en ninguna variable retornando a un funcionamiento adecuado en la interacción del SNA y el sistema cardiovascular (17).

#### **4.4 Los efectos del ejercicio en la Antártida**

El ejercicio físico se ha considerado una herramienta para la mejora de la salud, actualmente se presenta un incremento mundial en el interés sobre el ejercicio y los estilos de vida. La Antártida y los análogos espaciales, no han sido ajenos a los beneficios y los efectos que genera el ejercicio en la prevención, mantenimiento y recuperación de la salud y rendimiento físico, cognitivo y emocional.

La NASA en la estación espacial internacional (ISS), ya ha integrado programas preventivos para la preparación a viajes espaciales, los cuales han sido desarrollados a partir de la identificación de las necesidades del cuerpo humano a partir de la evaluación fisiológica; así mismo, se han incorporado protocolos estrictos durante el vuelo espacial, para disminuir los impactos sistémicos que genera un viaje al espacio, a lo cual se le conoce como contramedidas. Por lo tanto, la Antártida al ser un ambiente análogo a las misiones espaciales, también ha desarrollado algunas intervenciones que permiten identificar el efecto que tiene el ejercicio en el ser humano que se expone al ambiente Antártico y el ejercicio como contramedida en las consecuencias que genera un viaje a la

---

Antártida en el cuerpo humano, siendo un tema que aún falta por investigar con más especificidad.

Moraes et al. (9), en un estudio longitudinal descriptivo, evaluó a 7 paleontólogos investigadores brasileños (cinco hombres y dos mujeres) y 2 montañistas profesionales los dos hombres, cuyas características se relacionan en la Tabla 6, fueron evaluados 3 semanas previas a la expedición y 24 a 72 horas posterior a la expedición en un buque polar de la armada de Brasil. Las variables fisiológicas a estudiar fueron, los parámetros antropométricos por medio de toma de pliegues cutáneos con un calibrador de pliegues cutáneos; la aptitud aeróbica por medio de una prueba incremental al fallo en cinta rodante, excepto un individuo quién la realizó en bicicleta por dolor articular en la rodilla, estimaron el VO<sub>2</sub>max, se registró la FC con un monitor (Polar® S810i, Polar, Finland) y la percepción de la fatiga con la escala de percepción de Borg; adicionalmente, se midió la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) con registros del intervalo RR utilizando el mismo monitor de FC previamente descrito, la medición se realizó en reposo durante 20 minutos de la cual se registraron 10 minutos y se analizaron 5 minutos de registro de la misma toma en reposo; así mismo, se realizó el registro de los esfuerzos físicos en la expedición, midiendo los pasos realizados por medio de un podómetro, la FC utilizando el dispositivo polar, lactato en sangre por medio de una punción digital al final de la jornada de labores en campo y la temperatura de la piel en diferentes momentos a lo largo del día por medio de un termómetro (Serie 4600, Yellow Springs Instruments®) conectado a cinco sitios de la piel y un termómetro infrarrojo(Fluke 568, © 1995-2010 Fluke Corporation, OH, EE. UU.®).

**Tabla 5.** Características de voluntario (n=9) investigadores (n=7) montañistas (n=2) evaluados antes y después de la expedición Antártida. Moraes et al, 2018 (9).

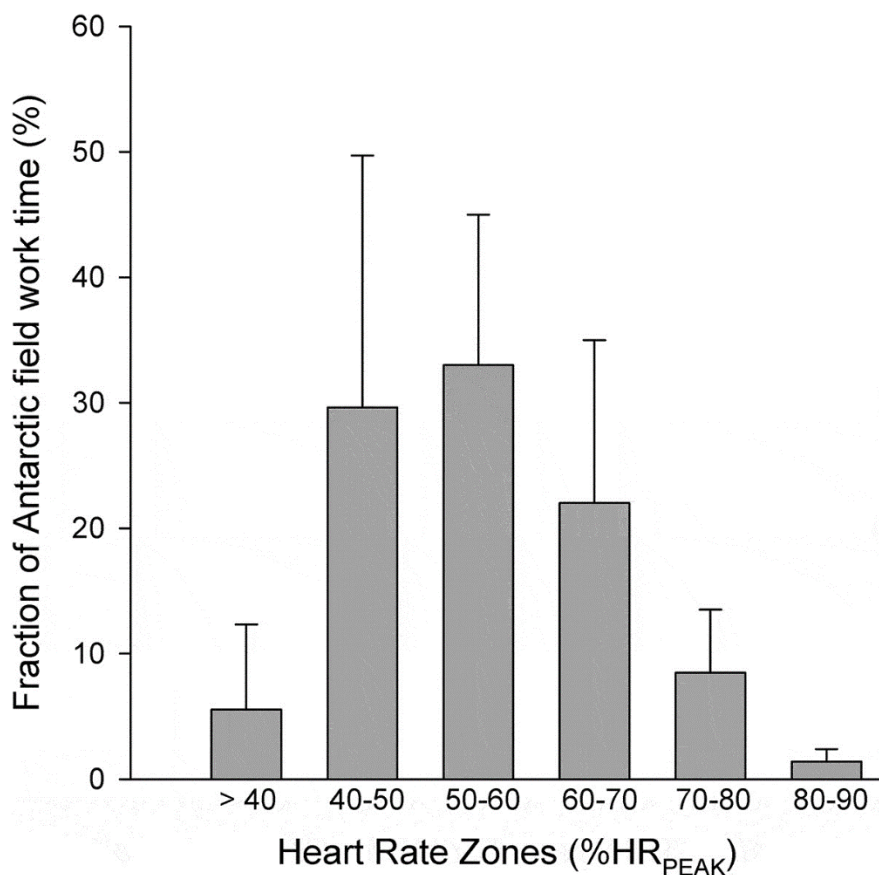
	Paleontologists (n = 7)		Mountaineers (n = 2)	
	Pre-Antarctic Field Expedition	Post-Antarctic Field Expedition	Pre-Antarctic Field Expedition	Post-Antarctic Field Expedition
Age (years)	36.0 ± 8.0		57.0 ± 7.1	
Height (cm)	170.3. ± 10.0		175.5 ± 0.7	
Body mass (kg)	85.1 ± 26.5	84.3 ± 24.3	82.15 ± 11.9	81.25 ± 11.10
Body fat (%)	29.5 ± 8.7	27.6 ± 7.44	20.5 ± 10.1	19.9 ± 9.9
ΣSkinfold (mm)	180.3 ± 45.5	170.4 ± 38.3	121.5 ± 65.7	118.0 ± 65.0

Moraes et al. (9), caracterizaron las actividades físicas realizadas durante las actividades de prospección de fósiles, determinando el tipo de ejercicio que realizaron los expedicionarios, por medio de un podómetro (Omron® Healthcare Co., Ltd., HJ-321LA, Kyoto, Japón) ubicado en la cintura de los voluntarios. La FC se midió en los expedicionarios con rol de investigadores únicamente con una banda alrededor del pecho (Polar® S810i, Polar, Finlandia), durante alrededor de 6 horas de actividad. La información de la FC permitió clasificar los esfuerzos por zonas de trabajo <50%, entre 50%-60%, del 60% al 70%, del 70% al 80% y del 80% al 90% respecto a la FC max obtenida de las pruebas de esfuerzo pre-expedición. Adicionalmente, se midió el lactato únicamente en investigadores realizando la medición al inicio y al final de la actividad diaria utilizando un analizador (Accutrend Plus Roche®, Suiza). Los análisis estadísticos los realizaron con las prueba Shapiro-Wilk , SigmaPlot, ANOVAS, efecto d de Cohen y pruebas Student-Newman-Keuls post hoc.

La caracterización del esfuerzo físico es uno de los aportes relevantes que hace Moraes et al.(9), ya que permite reconocer el tipo de ejercicio que realizan los expedicionarios y los efectos que genera durante la estancia antártica, aunque no todas las expediciones llevan a cabo las mismas actividades de investigación, este análisis permite caracterizar la actividad física realizada y da paso a otros investigadores para replicar protocolos y ampliar el conocimiento científico del área.

Los resultados evidenciaron que el promedio de pasos realizados durante el campamento fue de  $176.261 \pm 46.628$  pasos; la diferencia de pasos entre investigadores y montañistas tuvo un tamaño de efecto bajo  $ES=0,21$  los investigadores realizaron  $178.439 \pm 50.623$  pasos y los montañistas realizaron  $168.639 \pm 43.221$  pasos, lo que implica que los expedicionarios, sin importar el rol, realizaron la misma actividad durante la expedición. En las actividades de prospección de fósiles, la FC en investigadores, también fue monitoreada, los resultados evidencian que la mayor parte del tiempo de actividad  $68,6 \pm 36,6\%$  estuvieron en zona de trabajo menor al 60 % de la FCmax y en menor tiempo  $1,4 \pm 1\%$  en el rango de 80%-90% FCmax, como se muestra en la ilustración 6, habiendo una predominancia en una zona de trabajo aeróbica, una actividad de baja intensidad.

**Ilustración 4.** Clasificación del esfuerzo físico por zonas de trabajo respecto a la frecuencia cardiaca durante la expedición, Moraes et al. 2018 (9).



En consecuencia los resultados obtenidos sobre la respuesta fisiológica a la actividad de carácter aeróbico en una expedición de prospección de fósiles, permitió evidenciar que los

cambios en el VO<sub>2</sub>max de los individuos fueron dependientes del nivel de aptitud física previo, ya que para los montañistas que eran personas entrenadas Vo<sub>2</sub>max pre Antártida 46,6± 4,4 mL x Kg x min, implicó una reducción de su capacidad de consumo de oxígeno Vo<sub>2</sub>max post Antártida 40 mL x Kg x min, en coherencia el aumento de la FC durante la 7ª etapa de la prueba de esfuerzo pre 120 ± 1Lpm vs post 146 ± 2 Lpm, denotó un desacondicionamiento físico por una carga insuficiente dado su nivel de entrenamiento previo.

Por el contrario, para los evaluados con rol de investigadores en la expedición, quienes eran personas no entrenadas con un VO<sub>2</sub>max pre Antártida 37,9± 4,1 mL x Kg x min, se observó un aumento significativo en su VO<sub>2</sub>max de 5,9 ± 6,4% con un valor de P = 0,043 (p<0,05), lo que significó obtener un VO<sub>2</sub>max post Antártida de 40± 4 mLxkg<sup>-1</sup>xmin<sup>-1</sup>; coherente con la Frecuencia Cardíaca, la cual disminuyó significativamente post expedición con valor de P = 0,012 (p<0,05), de acuerdo a la FC registrada en la 7ª etapa de la prueba incremental de esfuerzo, pre-expedición, 175 ± 8 Lpm vs post-expedición, 166 ± 13 Lpm, lo que evidencia una aclimatación fisiológica cardiovascular y respiratoria inducida por el estímulo aeróbico de los esfuerzos realizados en campo y una mayor eficiencia cardiovascular en un esfuerzo máximo en el rol de investigadores; por otra parte los valores de lactato no cambiaron, se presume que debido a las condiciones de la toma de la muestra, los expedicionarios realizaban caminatas de baja intensidad de regreso al campamento, lo cual pudo generar un aclaramiento de lactato en sangre; por lo tanto, no fue posible relacionarlo como un efecto del ejercicio.

El aumento del VO<sub>2</sub>max se relaciona con un aumento del volumen sanguíneo, el cual asocia una mayor contractilidad cardíaca, aumenta el volumen sistólico en reposo y en ejercicio submáximo, reduciendo la FC de forma eficiente para mantener un determinado gasto cardíaco; por lo anterior, la disminución de la FC observada en sujetos de estudios con rol de investigadores indica un proceso de aclimatación fisiológica generada por el esfuerzo aeróbico caracterizado por las actividades de campo en la expedición, cuya carga se consideraba un estímulo necesario para mejorar su aptitud previa; contrario a esto, el aumento de la FC en los montañistas revelan la disminución de la eficiencia cardíaca en esfuerzos de una intensidad determinada.

Adicionalmente, los resultados indicaron que la FC de los investigadores no cambió significativamente con valores de  $p=0,726$ , por el contrario en montañistas sí hubo un aumento importante de acuerdo al factor *d de cohen*  $ES=1,64$  de la FC en reposo, la cual previa a la expedición fue de  $54,37 \pm 6,47$  lpm y post expedición fue de  $62,45 \pm 2,54$  lpm, indicador de un desacondicionamiento y una disminución en la eficiencia cardiaca. Los resultados en la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) en los montañistas se analizan por el tamaño del efecto (ES) indicando una disminución de la VFC en los parámetros del NN50% (pre  $23,50 \pm 33,23\%$  vs post  $5,50 \pm 7,78\%$ ) con un tamaño de efecto medio  $ES=0,75$ ; así mismo PNN50% (valor pre  $10,15 \pm 14,35\%$  vs post  $2,14 \pm 3,03\%$ ) con un tamaño de efecto medio  $ES=0,77$ , estos resultados reflejan disminuciones notables y no triviales de la VFC, relacionados con la reducción de la actividad cardiaca parasimpática, posiblemente por el efecto de disminución de la capacidad aeróbica de los montañistas.

Por su parte, los investigadores tuvieron resultados importantes en el dominio de la frecuencia, hubo una reducción en la banda LF estadísticamente significativa  $p=0,038$  con valores pre  $431,20 \pm 180,94$  vs post  $230,17 \pm 200,41$ , en concordancia los valores de la potencia espectral absoluta (LF+HF) disminuyeron significativamente  $P=0,011$  debido a que pre expedición se obtuvo un valor de  $705,60 \pm 239,10$  y post expedición  $454,83 \pm 245,87$ ; esta disminución de la VFC en investigadores, representa una menor reactividad del SNA sobre el corazón tanto del SNP como el SNS, esta disminución podría deberse a un aumento en la fatiga por sobrecarga dado que para los investigadores el estímulo de las actividades generaba un impacto importante.

Como plantea Koschate et al.(23), el entrenamiento de la resistencia aeróbica es un método principal para conservar y mejorar la aptitud física, a largo plazo el entrenamiento de metodologías continuas e interválicas, promueven mayor eficiencia cardiovascular acelerando la cinética de la FC, del  $VO_2\max$  y la capacidad respiratoria; sin embargo, los espacios y la disponibilidad de herramientas, su transporte y actividades logísticas, pueden dificultar su desarrollo en misiones antárticas.

Por lo tanto, Balakrishnan et al.(22), realizaron el diseño de un programa de yoga para expedicionarios a la Antártida como metodología para contrarrestar los efectos ICE del ambiente extremo, principalmente para la mejora del estado de ánimo, aliviando el estrés, así mismo favorecer la termorregulación y mejorar el sueño. Basado en una revisión temática tanto en textos de yoga clásico como contemporáneos, se diseñó un módulo de yoga que incluyó movimientos lentos, que permitieran generar conciencia de la respiración, movimientos de relajación, no se incluyeron ejercicios que implicaran prácticas grupales dado el espacio en las estaciones, tampoco las prácticas contraindicadas en trastorno cardiovasculares, ni hipertensión. El módulo fue evaluado por 30 expertos en yoga, quienes calificaron y validaron el módulo por medio del método Lawshe, se excluyó un viparitakarani de práctica con CVR  $<0,6$ . El CVR promedio para todo el módulo de Yoga fue de 0,89. Se destacó la necesidad de incluir las prácticas de Suryanamaskara (saludo al sol), de relajación, conciencia respiratoria y pranayama, coincidieron en prácticas de 1 hora.

Por otra parte, el ejercicio genera efectos principales en el sistema musculo esquelético, aunque no hay gran evidencia de estudios que se relacionen en un contexto Antártico en humanos.

O'Leary et al. (26), realizaron una evaluación de las respuestas esqueléticas en una travesía a la Antártida durante 61 días recorriendo 1700km transportando trineos de 80 kg sin asistencia, en la que 6 mujeres con edad media de  $32\pm 3$  con estatura de  $1,72\pm 0,07$ cm y una masa corporal de  $72,8\pm 4$  kg; las participantes fueron voluntarias y pasaron por un proceso de selección extenso, además, utilizaron diferentes métodos anticonceptivos con la intención de inducir amenorrea durante la expedición, únicamente una de las participantes menstruó dos veces fuera de la fecha prevista. Las valoraciones se realizaron 39 días pre expedición y 15 días post expedición específicamente 36 horas después de su regreso a reino unido.

Las variables que se midieron para evaluar la salud y resistencia ósea, empezó con la medición de la densidad de mineral ósea de todo el cuerpo (aDMO) ( $\text{mg HA}\cdot\text{cm}^3$ ) mediante pruebas de rayos X no invasivo (DXA), así mismo se midió la DMO de brazos, piernas, tronco, costillas, pelvis y columna en la exploración de todo el cuerpo; también se midió la



densidad mineral óseo volumétrica total de la tibia, volumen trabecular y cortical (vDMO) ( $\text{mg HA}\cdot\text{cm}^3$ ), fracción de volumen óseo trabecular (%), área trabecular ( $\text{mm}^2$ ), área cortical ( $\text{mm}^2$ ), grosor cortical (mm), grosor trabecular (mm), número trabecular ( $\text{mm}^{-1}$ ), separación trabecular (mm), porosidad cortical (%) y diámetro de poro cortical (mm), para esta valoración, se utilizó un sistema tridimensional una tomografía computarizada cuantitativa periférica de alta resolución (HR-pQCT) con lo que se obtuvo una representación tridimensional de 10 cm de la tibia de la lateralidad derecha a lo largo del eje del hueso, se analizó 4% de la metáfisis tibial y 30% de la diáfisis tibial, lo cual se realizó a partir de 165 cortes de la tomografía computarizada (TC) con un voxel isotrópico de 61  $\mu\text{m}$ , la longitud de la tibia fue tomada como la distancia entre el maléolo medial y la placa terminal tibial.

Adicionalmente, se midieron marcadores bioquímicos del recambio óseo, con una muestra de sangre que se tomó después de ayuno nocturno, los marcadores medidos fueron: fosfatasa alcalina específica del hueso (BALP), procolágeno tipo 1 N-terminal propeptido (P1NP) marcador de formación ósea, esclerostina proteína implicada en la regulación del crecimiento óseo, telopéptido C-terminal del colágeno tipo I (CTX) un marcador de resorción ósea, 25- hidroxivitamina D total, magnesio, fosfato, calcio, albúmina. Posteriormente, el análisis de los datos empezó con la verificación de distribución normal de los datos, la comparación pre y post expedición se utilizó pruebas t para muestras pareadas, se presentan con diferencia absoluta media con intervalos de confianza del 95%, los resultados no paramétricos (aDMO), se analizaron con la prueba de Wilcoxon. Se utilizó un ANOVA de medidas repetitivas para evaluar el efecto del tiempo, si se encontraba un efecto principal significativo, se utilizaban pruebas t no corregidas post-hoc para comparar los diferentes puntos temporales, también, se reportó el tamaño del efecto utilizando d de cohen.

Los resultados obtenidos indicaron que hubo una disminución estadísticamente significativa en la aDMO del tronco pre: -0,05 post: -0,01 con valor de  $P = 0,046$ , costillas  $P = 0,007$  pre: -0,07 post: -0,02 y columna  $P = 0,046$  pre: -0,07 post: -0,00, en la comparación pre y post expedición, los demás parámetros aDMO, vDMO, la geometría y la microarquitectura no tuvieron cambios estadísticamente significativos. Aunque esta investigación no relacionó resultados respecto a la masa o la fuerza muscular, es importante destacar la relación que tienen estos por diferentes factores como el genético,

endocrino y mecánico; por lo tanto, algunos cambios fisiológicos tienen implicación en el deterioro de los dos tejidos, como la deficiencia de vitamina D, la disminución de la hormona de crecimiento, la alteración de estrógenos y testosterona, cambios en la hormona tiroidea, la falta de estímulos mecánicos como la exposición a ambientes con microgravedad (30). En dicha expedición, no hubo cambios en la estructura ósea inferior, una señal que indicó que el estímulo de las características del esquí permitió mantener el tejido “el perfil de carga mecánica de la expedición sigue siendo desconocido, sin embargo, el esquí parece osteogénico para las extremidades inferiores”(26).

Sin embargo, en la misma expedición, los mismos sujetos de estudio tuvieron una valoración hormonal y metabólica, la cual reportó una pérdida en promedio  $9,4 \pm 2,3$  kg de masa corporal (-13%), que comprendió principalmente grasa corporal, y tuvieron reducciones marcadas en leptina, aunque no se ha incluido en la revisión, estos datos permiten relacionarse con los cambios en la aDMO, los cuales pudieron deberse a una disminución en la disponibilidad de energía en el recambio óseo, dada la implicación indirecta sobre el hueso “al suprimir el eje HPG (lo que conduce a la amenorrea hipotalámica funcional), disminuir el estradiol y estimular la resorción ósea, aunque el estradiol sólo disminuye en déficit energético severo”(26).

Por su parte, los resultados bioquímicos del recambio óseo mostró que los niveles de BALP eran significativamente más altos 15 días después de la expedición  $P=0,028$  en comparación con los niveles observados a los 4 días después de la expedición, la reducción de BALP pre expedición vs 4 días post expedición, sugiere una disminución en la actividad osteoblástica en la formación ósea, lo cual pudo contribuir a las reducciones de aDMO debidas adicionalmente a una posible baja disponibilidad energética y un elevado gasto por la actividad realizada, sin embargo el aumento pudiera indicar una recuperación en el modelamiento óseo o en la actividad osteoblástica 15 días post expedición una señal de aclimatación al estrés o a la baja disponibilidad energética que se experimentó durante la expedición. El fosfato tuvo un aumento significativo 15 días post expedición respecto al valor pre-expedición con valor en  $p=0,028$  y 4 días post expedición

valor de  $p=0,046$ ; hubo una disminución estadísticamente significativa de la 25 (OH)D a partir del valor pre expedición vs 4 días post expedición con significancia de  $P=0,008$ .

Así mismo, Parent et al.(27), realizaron una expedición similar, que consistió primero en cruzar por mar en Vela 1700km, luego 30 días en la Antártida en el Forbidden Plateau realizando una travesía en esquí y arrastre de trineos de aproximadamente 100 kg incluyendo equipaje, que representó de 10 a 15 horas por día con 12 horas de luz solar, además se controló la ingesta de calorías por medio de comida liofilizada y barras calóricas con aporte entre 5800 a 6500 calorías por persona por día. La altitud máxima registrada fue de 2200m y el altiplano de 1400m de altitud se recorrió 160km utilizando ropa de última tecnología, estuvieron expuestos a escenarios donde la visibilidad y el contraste se redujeron fuertemente por la nieve, temperaturas registradas entre  $-20^{\circ}\text{a}-40^{\circ}\text{C}$  y finalmente se retornó a Ushuaia, Argentina una semana antes de regresar a Canadá. En ese caso fueron 6 exploradores (3 mujeres y 3 hombres) con edad promedio de  $25\pm 4$  años, compuesto por tres guías de turismo de aventura, un escalador, un exmilitar y uno sin experiencia en este tipo de expediciones.

Previo a la expedición, los sujetos tuvieron 7 días de pre- expedición, para generar una aclimatación y organizar la logística en campo de hielo en Columbia, así mismo revisar las condiciones a las cuales se iban a exponer, las técnicas del equipo en el trabajo y los escenarios físico y psicológico; adicionalmente, a diferencia de muchos de las investigaciones, Parent et al. (27), realizaron una preparación previa de alrededor de un año, en la cual los expedicionarios debían llevar un diario de sus actividades laborales diarias, registrar la distancia recorrida en las actividades de aventura, dado que la mayoría eran guías de turismo de aventura, registrar las calorías consumidas y la FC monitorizada por un polar. Así mismo, tuvieron una guía de ejercicios de calistenia que son trabajos de autocarga, en pro del aumento de la fuerza y la resistencia necesario para la expedición; y en concordancia se hicieron recomendaciones frente al aumento del peso tanto en masa grasa y muscular para favorecer el mantenimiento en la expedición.

Para comenzar se realizaron medidas antropométricas especialmente se midió la grasa corporal por medio de absorciometría dual de rayos X (GE Prodigy Lunar, EEUU) realizando varias mediciones, en primer momento tres meses antes de la expedición, posteriormente, una semana antes al vuelo a Argentina y finalmente la semana posterior al regreso de Argentina; también se evaluó la aptitud muscular, realizando una prueba de dinamometría (fuerza de agarre), con 2 repeticiones en cada lateralidad, adicionalmente, la prueba de suspensión en barra que consistió en mantener una flexión de codo a 90° en suspensión en barra hasta el fallo. Así mismo, la prueba de sentadilla isométrica contra la pared en la que las rodillas se mantuvieron flexionadas a 90° en isometría hasta el fallo, seguido de una prueba de fuerza de 6 RM en prensa de piernas unipodal y dominadas con chaleco lastrado.

En cuanto a la evaluación de la capacidad aeróbica se realizó una prueba aeróbica máxima específica (SMAT), que consistió en realizar una marcha progresiva en una cinta rodante con un soporte que simulaba el arrastre del trineo. La resistencia inició con 10 Lb y cada minuto se aumentó 10 Lb hasta el agotamiento, manteniendo mínimo una velocidad de 1m/s. Se analizaron parámetros cardiorrespiratorios VE, VO<sub>2</sub>, FC por medio de analizador metabólico portátil (K4b2, Cosmed, Italia) y se registró la resistencia máxima alcanzada y la percepción del esfuerzo (PE) con escala de Borg. Incluso, se evaluó por medio de la prueba de velocidad aeróbica máxima en carrera (MARS), una prueba de carrera máxima progresiva en cinta rodante, iniciando con velocidad de 8km/h con inclinación de 1% como calentamiento durante 3 minutos, posteriormente la velocidad aumentó en 1km/h hasta el agotamiento. Se analizaron parámetros cardiorrespiratorios VE, VO<sub>2</sub>, FC por medio de analizador metabólico portátil (K4b2, Cosmed, Italia) y se registró la resistencia máxima alcanzada y la PE.

Finalmente se realizó una prueba muscular y prueba sub máxima aeróbica con temperatura ambiente controlada y fría. La temperatura controlada 20° ±1° C y temperatura fría -1°±8°C. En este sentido, se realizaron las pruebas de dinamometría y suspensión en barra y adicionalmente una prueba sub máxima que consistió en una prueba de escalón a un ritmo de dos pulsos para subir y dos pulsos para bajar del escalón. Se

analizaron parámetros cardiorrespiratorios VE, VO<sub>2</sub>, FC por medio de analizador metabólico portátil (K4b2, Cosmed, Italia) y se registró la resistencia máxima alcanzada y la PE. C El ritmo inicial fue de 18 escalones por minuto durante tres minutos con 15 segundos de descanso, seguido de dos etapas adicionales donde el ritmo se incrementó a 24 y 30 escalones por minuto. La temperatura timpánica (Braun Thermoscan Pro 4000, Braun, EE. UU.) se midió posterior al ejercicio y se utilizó la misma ropa para los dos protocolos.

El análisis estadístico se realizó con una prueba shapiro-Wilk para comprobar la distribución normal; la comparación del efecto pre y post expedición se analizó con la prueba no paramétrica Wilkonson para los datos que no estaban distribuidos con normalidad y la prueba t para los datos distribuidos normalmente. La significancia se fijó en  $p < 0,05$ , el tamaño del efecto se calculó utilizando d de cohen.

Las medidas antropométricas representaron un aumento estadísticamente significativo respecto al peso de masa magra en donde antes de la expedición las mujeres registraron  $45,4 \pm 4,4$  kg y posterior a la expedición  $47,1 \pm 4,1$  kg dado una diferencia significativa de  $p = 0,040$ , así mismo, de manera grupal hubo una disminución significativa del % graso ya que previo a la expedición contaban con  $22 \pm 7,7\%$  y posterior  $20,1 \pm 7,9\%$  de tejido graso con valor en  $p = 0,014$ ; el aumento de la masa magra pudo generar un impacto importante en el mantenimiento de la capacidad física de los expedicionarios.

En efecto, el impacto de la expedición sobre la aptitud muscular se evidenció en la prueba de RM extrapolada de la pierna izquierda, dado un aumento estadísticamente significativo, registrando previo a la expedición  $295 \pm 110$  Lb y posterior a la expedición aumentó a  $364 \pm 135$  Lb el máximo peso levantado a 1 Repetición con un valor de  $p = 0,031$ . En adición, en la prueba aeróbica máxima específica (SMAT) el VO<sub>2</sub>max aumentó significativamente  $p = 0,027$  con un valor pre expedición de  $40,8 \pm 4,2$  ml/kg/min incrementando posterior a la expedición a  $46,9 \pm 7,4$  (ml/kg/min), mejorando la capacidad aeróbica de los expedicionarios, así mismo previo a la expedición se registró un %VO<sub>2</sub> en VT de  $65,3 \pm 6,2\%$  y posterior a la expedición  $77,2 \pm 8,5\%$  con un aumento estadísticamente

significativo de  $p=0,003$  lo que implicó que los expedicionarios pudieran trabajar a mayor intensidad antes de llegar a su umbral de ventilación, lo cual fue un indicador de mejora en la eficiencia cardiorrespiratoria y una mejoría en la capacidad aeróbica, incluso, el VO<sub>2</sub> en VT también tuvo un aumento estadísticamente significativo  $P=0,027$  con valores pre de  $29,6\pm 2,3$  ml/kg/min vs post  $35,8\pm 2,9$  ml/kg/min, en consecuencia este resultado representa una mayor eficiencia de sistema cardiorrespiratorio y muscular en la utilización del oxígeno durante el ejercicio, implicando mayor rendimiento y un retardo en la aparición de la fatiga en intensidades altas, de esta manera en MARS se evidenció una disminución estadísticamente significativa en los valores de VE pico que previo a la expedición fue de  $130,3\pm 18,6$  L/min y post expedición fue de  $119,5\pm 15,4$  con una significancia de  $p=0,037$ , dicha reducción acompañado refuerza la mejora de la eficiencia cardiorrespiratoria ya que se necesitó menos ventilación para llegar al mismo VO<sub>2</sub>max.

Tabla 6. Resultados sobre el impacto de la expedición en valores pre- expedición, post expedición y valores de significancia  $P=<0,05$ ; se presentan valores tanto por género como valores del grupo, Parent et al. 2018 (25).

	Pre-expedition			Post-expedition			p values (ES)		
	Women	Male	Group	Women	Male	Group	Women	Male	Group
<b>Muscular tests</b>									
Grip strength (kg)	72.0±5.3	126±7.9	99.0±30.2	74.7±17.0	115.0±13.9	94.8±26.1	0.655	0.109	0.464 (0.15)
SMT (s)	38±17	73±10	55±23	55±47	61±20	64±34	0.655	1.000	0.446 (0.31)
CMT (s)	180±79	189±46	185±58	150±57	139±48	164±50	0.109	0.593	0.133 (0.39)
LP <sub>LL</sub> 1MR <sub>ext</sub> (lb)	221±28	405±78	295±110	279±23	492±133	364±135*	0.180	0.180	0.031* (0.56)
LP <sub>RL</sub> 1RM <sub>ext</sub> (lb)	223±31	420±56	302±114	271±24	532±190	376±172	0.285	0.180	0.124 (0.51)
Chin-up1RM <sub>ext</sub> (lb)	77±11	119±3	98±24	76±10	114±9	95±23	0.593	0.285	0.241 (0.13)
<b>Aerobic tests</b>									
<b>SMAT</b>									
VO <sub>2</sub> peak (ml/kg/min)	38.9±1.7	42.8±5.4	40.8±4.2	42.6±4.6	51.3±7.6	46.9±7.4*	0.109	0.102	0.027* (1.01)
VO <sub>2</sub> peak (ml/kg lean mass/min)	55.6±4.4	54.1±2.9	54.9±3.4	58.7±1.0	62.4±14.1	60.5±9.2	0.285	0.180	0.104 (0.81)
HR peak (bpm)	176±6	187±6	182±8	187±10	186±7	186±8	0.109	1.000	0.262 (0.5)
VE peak (L/min)	98.3±11.9	143.7±8.4	121.0±26.5	93.7±7.6	142.7±16.2	118.2±29.1	0.109	1.000	0.560 (0.10)
%VO <sub>2</sub> at VT	69.8±3.6	60.9±4.8	65.3±6.2	82.9±5.1	71.6±7.8	77.2±8.5*	0.109	0.109	0.003* (1.60)
VO <sub>2</sub> at VT (ml/kg/min)	27.2±2.1	26.0±2.8	26.6±2.3	35.1±1.8	36.4±4.1	35.8±2.9*	0.109	0.109	0.027* (3.52)
<b>MARS</b>									
VO <sub>2</sub> peak (ml/kg/min)	42.8±4.7	45.0±3.6	44.0±3.9	41.6±3.3	47.9±9.3	44.7±7.0	0.655	0.655	1.000 (0.12)
VO <sub>2</sub> peak (ml/kg lean mass/min)	59.1±3.3	56.2±4.5	57.6±4.0	60.2±2.9	59.5±16.1	59.8±10.4	0.276	1.000	0.916 (0.28)
HR peak (bpm)	193±13	192±3	193±7	192±4.9	187±3.8	89±4	0.655	0.180	0.241 (0.70)
VE peak (L/min)	115.0±10.0	145.7±7.5	130.3±18.6	108.0±12.8	131.0±5.6	119.5±15.4*	0.109	0.180	0.037* (0.63)
%VO <sub>2</sub> at VT	85.4±3.5	76.2±3.8	80.8±5.8	89.6±5.1	88.7±1.1	89.1±3.3	0.285	0.109	0.020* (1.76)
VO <sub>2</sub> at VT (ml/kg/min)	35.8±3.5	33.6±3.3	34.7±3.3	37.3±3.5	42.5±8.7	39.3±6.6	0.285	0.109	0.046* (0.88)

No obstante, la valoración de la aptitud muscular y cardiorrespiratorio en ambiente controlado y frío, denotaron cambios importantes; el VO<sub>2</sub> en la etapa 2 disminuyó estadísticamente significativo posterior a la expedición con un valor de  $p=0,027$  para ejercicio en exposición de frío ( $21,5\pm 1,8$  ml/kg/min pre vs  $17,7\pm 3,4$  ml/kg/min post), en la misma etapa, la Fc registró pre expedición  $109\pm 5$ ppm y disminuyó a un valor de  $102\pm 8$ ppm

siendo estadísticamente significativa la reducción  $p=0,025$  en frío y adicionalmente, el  $VO_2$  en la última etapa también disminuyó de  $24,5\pm 3\text{ml/kg/min}$  pre expedición hasta  $21,0\pm 4,3\text{ml/kg/min}$  posterior a la expedición, una disminución que fue significativa estadísticamente  $p=0,042$ ; estos resultados fueron indicadores de un impacto positivo en la capacidad aeróbica de los expedicionarios específicamente en condiciones de frío pero no cambió otros parámetros, aunque no es claro si hay una mejora de la aptitud física o se atribuye a una mayor efectividad dada la necesidad menor de costo energético. “La mejora puede observarse en el costo metabólico ( $VO_2$ ) durante la segunda y la última etapa de la prueba; para el mismo nivel de intensidad, la tripulación necesitaba consumir significativamente menos energía después de la expedición, incluso si en la temperatura controlada no se observó una diferencia significativa” (27)

La mayor evidencia de estos efectos que impactan la fisiología de los expedicionarios Antárticos ha tenido grandes limitaciones, como el tiempo de estancia y la cantidad de expedicionarios, dada la dificultad metodológica que estas investigaciones requieren; sin embargo Simpson & Maynard (31) realizaron un estudio observacional longitudinal prospectivo en la estación de investigación Rothera, en una estancia de un año a un grupo de 21 (18 hombres) expedicionarios que pasarían el invierno de enero 2007 a enero 2008, quienes tenían diferentes ocupaciones (comandante de base, chef, meteorólogo, médico, carpintero, electricista, mecánico, entre otros). Una muestra heterogénea dadas sus características que se visualizan en la (Tabla 8).

**Tabla 7.** Caracterización de los expedicionarios. Simpson & Maynard 2012 (30).

	Significar	Rango
Años de edad)	30,6 (6,05)	21-45
Altura (m)	1,78 (0,0867)	1,55-1,90
Peso (kg)	79,5 (12,3)	56-112
IMC ( $\text{kg/m}^2$ )	25,2 (3,29)	20,2-34,0
Grasa corporal (%)	20.3 (6.66)	12,0-34,4
Masculino	19,0 (5,92)	12,0-32,4
Femenino	28,4 (5,50)	23,5-34,4
$VO_{2\text{máx}}$ ( ml /kg/min)	60,2 (9,26)	37,0-74,0

Se tomó el peso corporal inicial en una báscula (Tiger) y posteriormente en la segunda mitad de las mediciones se volvió a registrar utilizando la báscula (Seca Model 713; Seca Ltd, Birmingham, Reino Unido); el tejido graso se halló por medio de la medición de pliegues cutáneos con calibradores (Harpender; John Bull, British Indicators Ltd, Reino Unido); la ingesta de alimentos se evaluó utilizando registros de 3 días de la dieta de alimentos que se analizaron para reconocer una medida de ingesta calórica durante 24 horas utilizando un software de análisis nutricional (versión WinDiets); la actividad se valoró por medio de recuento de pasos utilizando un rastreador activPAL (serie activPAL 8.0; PAL Technologies Ltd, Glasgow, Reino Unido), elemento fijado en la parte anterior del muslo derecho durante 72 horas y la capacidad aeróbica se evaluó con la medición del VO<sub>2</sub>max de manera indirecta hallado en cinta rodante Costill-Fox siguiendo el protocolo de Astrand modificado, el cual consistía en cada 2 minutos aumentar 2% la inclinación de la cinta rodante, iniciando con un calentamiento de 10 minutos con 0% de gradiente y la velocidad de la prueba se estableció en 2,7 m/s o 4 m/s según el nivel de condición física de cada sujeto; estas mediciones se realizaron cada 30 días en horario a conveniencia y de manera individual. El nivel de significancia se estableció en  $p=0,05$ , se utilizó la correlación de Pearson para la relación entre las medidas de dinámica energética, aptitud aeróbica y marcadores climáticos, así mismo utilizaron un modelo lineal general de medidas repetidas.

Los resultados en el peso corporal mostraron una fluctuación durante el año, esta variación fue estadísticamente significativa  $p=0,012$ , en enero 2007 se registró un peso de 84 kg para febrero del mismo año hubo una disminución a 83,1 kg, luego hubo un aumento entre mayo junio y julio de 85,9 kg coincidiendo con los meses de invierno y luego volvió a disminuir constantemente hasta 82,5 kg en diciembre, por su parte, la grasa corporal también tuvo variaciones en el transcurso del año que fueron estadísticamente significativas con un valor de  $p=0,049$ , en enero se registró el 23,4% de grasa corporal aumentando progresivamente hasta los meses de Julio en donde hubo el mayor aumento de 24,6% y posteriormente una disminución progresiva hasta diciembre registrando un 22,4% de grasa corporal. La tendencia en el aumento del peso se dio en los meses de invierno y la disminución en los meses de verano.



Por el contrario, la capacidad aeróbica no tuvo fluctuaciones en el transcurso del año y se registró una media no ponderada de 57-61 ml/kg/min de VO<sub>2</sub>max, no hubo cambios estadísticamente significativos, la actividad que realizaron los expedicionarios tuvo un registro de 9.300 pasos/día en invierno, con un aumento en verano hasta 12.900 pasos/día para el mes más activo que fue octubre y en Diciembre volvió a caer a 9.400 pasos/día, ese registro no tuvo significancia estadística; sin embargo es importante destacar que los expedicionarios registraron una actividad física adecuada y aunque la estación no tenía una exigencia de caminata importante, se evidencia que los expedicionarios complementaban sus demandas con “actividades deportivas y de ocio para mantenerse activos”(32), dicha actividad realizada permitió que los expedicionarios mantuvieran su condición física y evitó la fluctuación durante el año de expedición Antártico.

Adicionalmente, la asociación entre la aptitud aeróbica y la grasa corporal mostraron una alta correlación negativa ( $r=-0,779$  a  $-0,954$ ;  $n=8$  a  $18$ ;  $p=0,000$  a  $0,001$ ), lo que implicó que en la medida que mejoró la aptitud aeróbica por un aumento del VO<sub>2</sub>max, disminuyó el % graso.



## Discusión

La revisión identificó que en el sistema muscular hay pocos hallazgos en el ambiente antártico, Parent et al. 2018 (27), resaltó un cambio en la aptitud muscular posterior a una travesía de esquí en la Antártida durante un año, representado por un aumento estadísticamente significativo de la fuerza máxima de la pierna izquierda en prensa 6RM  $p=0,031$  pre:  $295 \pm 110$  Lb post:  $364 \pm 135$  Lb, acompañado por un aumento significativo en el peso magro principalmente en mujeres  $p=0,040$  pre:  $45,4 \pm 4,4$  kg post:  $47,1 \pm 4,1$  kg lo cual implicó una mayor eficiencia muscular durante el ejercicio; coincidiendo con O'Brien et al. 2018 (24), quienes describieron la disminución estadísticamente significativa del tejido graso: 2,1%  $p=0,015$  pre: 20,7% ( $16 \pm 4,7$ kg) post: 18,6% ( $14 \pm 3,7$ kg), y el aumento en la fuerza muscular definida en la contracción muscular voluntaria (CMV)  $P=0,062$  pre: 204,5 Nm post: 226,5 Nm aunque no fue significativa, los valores se acercaron a ( $p=0,06$ ) y además un aumento de la masa magra del 2,1%  $p=0,015$  pre: 79,3% post: 81,4% que no generó cambio en el peso corporal dado que la disminución del tejido graso fue proporcional al aumento del tejido magro; sin embargo, hace falta mayor evidencia sobre los efectos fisiológicos en el sistema muscular en diferentes expediciones antárticas bajo condiciones ICE en humanos ya que Mantovani et al. 2022(18), aunque poco concluyente y explorado, evidenciaron que la exposición prolongada a temperaturas bajas genera atrofia muscular en ratones machos adultos dado a la disminución de la señalización AKT que fosforila FOXO quien promueve la inhibición del crecimiento celular, aunque difícil de extrapolar en humanos expuestos al ambiente Antártico ya que aunque en la Antártida se registra en verano temperaturas que pueden registrarse bajo cero hasta los  $-60^{\circ}\text{C}$ , en actividades de campo “la asociación entre la producción de calor metabólico generado por el esfuerzo físico y el microclima creado por la ropa aislante elevó la temperatura core durante los desplazamientos del trabajo de campo” (33), registrando T CORE entre  $37^{\circ}\text{C}$  y  $38^{\circ}\text{C}$ .

Por otra parte, la mayoría de las investigaciones reportan cambios en la composición corporal, Moraes et al. 2018 (9), reportaron de acuerdo al rol de los sujetos en la expedición, una disminución en el %graso en paleontólogos: pre:29,5±8,7 post:27,6±7,44 y en el %graso de montañistas: pre:20,5±10,1 post:19,9±9,9; además Parent et al. 2018 (27), identificaron que el peso magro en mujeres aumentó significativamente  $p=0,040$  pre: 45,4 ±4,4 kg post: 47,1 ±4,1 kg y el %graso tanto de hombres y mujeres disminuyó significativamente  $p=0,014$  pre:22±7,7% post 20,1±7,9%; por su parte Simpson, A., & Maynard, V. 2012(31), en un año de expedición de invierno monitorearon fluctuaciones en el peso corporal  $p=0,012$  Ene07 84 kg disminuyó para Feb07 83,1 kg aumentó en May-jun-jul07 85,9 kg y volvió a disminuir progresivamente hasta Dic07 82,5 kg, en la grasa corporal también hubo cambios significativos  $p=0,049$  Ene07 23,4% aumentando hasta jul07 24,6% y disminuyendo nuevamente hasta Dic07 22,4%, estas fluctuaciones reflejaron ajustes estacionarios y fisiológicos de la composición corporal ante las variaciones en la actividad y condiciones ambientales en una expedición de un periodo largo y con una población heterogénea.

Complementariamente, dos de ocho artículos destacaron un cambio de la aptitud muscular en expediciones antárticas y dos de ocho artículos evaluaron el sistema óseo a partir del cambio en la densidad del mineral óseo (DMO) y otros factores de salud ósea. Estas investigaciones identificaron una disminución estadísticamente significativa posterior a las expediciones antárticas, O'Brien et al. 2018 (24), reportaron una disminución estadísticamente significativa de la DMO de la columna vertebral de 1,8 (±0,9)%  $p=0,035$  pre:1,2 g/cm<sup>2</sup> post:1,13 g/cm<sup>2</sup> y O'Leary et al. 2019 (26), midieron y encontraron también disminuciones significativas de la DMO en tronco  $P = 0,046$  pre: -0,05 post: -0,01, columna  $P = 0,046$  pre: -0,07 post: -0,00 y costillas  $P = 0,007$  pre: -0,07 post: -0,02. La DMO en brazos, piernas, pelvis y cuerpo entero no tuvieron cambios significativos en comparación pre y post expedición. Los cambios fisiológicos en la DMO llaman la atención ya que posterior a una misión antártica de esquí y otra de campamento en temporada de invierno con exposición a altitudes de 2752 msnm, evidenciaron un fenómeno protector en ciertos huesos, frente al deterioro como en las extremidades y pelvis, adjudicado posiblemente a la carga mecánica y a la actividad física realizada durante la expedición, por su parte también se ha adjudicado un balance negativo de calcio por deficiencia de vitamina D y una dieta alta en sodio que contribuye a la disminución de la DMO(19); estos cambios, demuestran la necesidad de generar intervenciones que previamente protejan y

mantengan la salud ósea de los expedicionarios, como la suplementación de vitamina D en la dieta, concentraciones séricas más altas de vitamina D al inicio de las expediciones y ejercicio físico como contramedidas.

Por otra parte, el sistema cardiovascular fue evaluado por medio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en su relación con el SNA dada la integración con la contractilidad del corazón, Moraes et al. 2018 (9), distinguieron cambios de acuerdo al rol de los expedicionarios en donde en montañistas hubo disminución con un tamaño de efecto grande de la VFC en parámetros de NN50% ES=0,75 pre: 23,50±33,23 post: 5,50±7,78, PNN50% ES=0,77 pre: 10,15%±14,35 post: 2,14%±3,03 representando una disminución en la actividad parasimpática; por su parte, en el análisis del dominio de la frecuencia de la VFC en paleontólogos se evidenció una disminución estadísticamente significativa en LF p=0,038 pre: 431,20±180,94 post: 230,17±200,41 y LF/HF P=0,011 pre 705,60 ± 239,10 post: 454,83 ± 245,87 evidenciando una reducción en la actividad simpática del corazón. En cambio, Moraes et al. 2020 (17), en una etapa en barco realizaron mediciones durante la expedición los días 2, 16 y 26 concluyendo que RMSSD(d2) 24,2±5,7 ms disminuyó significativamente p= 0,03 RMSSD(d16) 16,9±5,4 ms y aumentó RMSSD(d26) 23,2±5,2ms y en el análisis del dominio de la frecuencia HF(d2) 266±103ms<sup>2</sup> disminuyó HF(d16) 139±145ms<sup>2</sup> luego aumentó significativamente p= 0,04 HF(d26) 239±119ms<sup>2</sup>, además en la relación LF/HF(d2) 1,5±0,6 aumentó LF/HF(d16) 3,6±2,5 y disminuyó LF/HF(d26) 1,6±0,7 p=0,03, estas fluctuaciones de la actividad simpática y parasimpática sugiere una aclimatación a cambios estacionarios en la respuesta vagal; por el contrario Maggioni et al. 2020 (34) encontró una disminución lineal de HF en una expedición de 14 meses, tanto en hombres como en mujeres (tendencia lineal: P = 0.033 y P = 0.048 para mujeres y hombres) interpretado como una reducción progresiva de la actividad parasimpática que podría vincularse con estrés o fatiga acumulada, los cambios en la VFC dependieron del sexo en otros parámetros.

De la misma forma, los resultados respecto al ejercicio en la Antártida permitieron reconocer el impacto fisiológico cardiorrespiratorio en la aptitud aeróbica posterior a una expedición, a partir del VO<sub>2</sub>max, O'Brien et al. 2018(24) registraron un aumento en este parámetro modificado al peso del tejido magro pre: 50,4 ml/kg de tejido magro post: 56,1 ml/kg de tejido magro p=0,0003 y un aumento significativo de RER pre: 8,85±0,30 post: 9,54±0,26 p=0,007 evidenciando una mayor eficiencia cardiovascular en ejercicio posterior a la misión; por el contrario Moraes et al. 2018 (9) determinaron que esos efectos

en la aptitud aeróbica dependían de la aptitud inicial del expedicionario por lo que el VO<sub>2</sub>max de montañistas disminuyó pre:46,6± 4,4 mL x Kg x min post:40 mL x Kg x min y el VO<sub>2</sub>max en paleontólogos aumentó 5,9 ± 6,4% P = 0,043 pre:37,9± 4,1 mL x Kg x min post:40± 4 mL x kg x min, esta relación fue indicada dado a que los montañistas evidenciaron un desacondicionamiento físico debido a que el estímulo físico era insuficiente para su capacidad inicial, por el contrario los paleontólogos considerados sedentarios al inicio de la expedición, mejoraron el parámetro por lo que el estímulo físico de la expedición significó una carga representativa para mejorar su condición respecto a su perfil inicial; Parent et al. 2018 (27) que evaluaron en condiciones de frío, estimaron una disminución significativa del VO<sub>2</sub>etapa2 p=0,027 pre:21,5±1,8 ml/kg/min post:17,7±3,4 ml/kg/min en la evaluación de la velocidad aeróbica máxima en carrera, pero en contradicción un aumento significativo Vo<sub>2</sub>max p= 0,027 pre:40,8±4,2 ml/kg/min post:46,9±7,4 ml/kg/min, del %VO<sub>2</sub> en VT p=0,003 pre:65,3±6,2% post:77,2±8,5 % y del VO<sub>2</sub> en VT P=0,027 pre:29,6±2,3 ml/kg/min post:35,8±2,9 ml/kg/min en la prueba aeróbica máxima específica, este comparativo podría deberse a la especificidad del estímulo realizado tanto en la expedición como en la evaluación del VO<sub>2</sub> max; por su parte Simpson, A., & Maynard, V. 2012(31), no tuvieron registro de fluctuaciones significativas en un año de estancia en la Antártida midiendo cada mes a los sujetos de investigación.

Los artículos de esta revisión que generan un contexto de ejercicio físico describen las actividades de las misiones como el estímulo de entrenamiento físico, O'Brien et al. 2018 (24) reportaron la actividad con un cuestionario de auto reporte que estipulaba si el trabajo en campo era vigoroso o leve y se identificó que posterior a la semana 11 de expedición hubo un descenso debido a que tuvo que establecerse un campamento de invierno por peligros ambientales; por el contrario Moraes et al. 2018 (9) caracterizaron el tipo de esfuerzo que realizaron los expedicionarios, quienes recorrieron 6,2±1,9km/día y 130,9±40,6km/21 días, realizando un total de pasos de 176.261±46.628 en la expedición y estableció el tiempo en el que las actividades estuvieron en unos rangos de la frecuencia cardiaca, T:35,2 ± el 25,6% FC:<50%, T:33,4 ± 11,9% FC: 50 y 60% ,T:22,3 ± 13,3% FC: 60 y 70%, T: 7,7 ± 5,3% FC: 70 y 80% , T: 1,4 ± 1,0% FC: 80 y 90%, indicando que la actividad en campo realizada en esta expedición tuvo una predominancia de actividades aeróbicas; de la misma forma Simpson, A., & Maynard, V. 2012 (31) cuantificaron el esfuerzo físico por medio de los pasos realizados e identificaron que en temporada de invierno se realizaron 9.300 pasos/día aumentando su actividad en verano a 12.900

pasos/día y volviendo a disminuir en Dic.9.400 pasos/día; por su parte, aunque Parent et al. 2018 (27) describen una misión de esquí con arrastre de una carga de 100kg por persona, con una actividad diaria de 10 a 15 horas, no cuantificaron el ejercicio físico realizado.

Esta revisión permitió visualizar las investigaciones de fisiología humana que se han realizado en la Antártida en un contexto de ejercicio físico, permitiendo identificar los protocolos de mediciones utilizados y los parámetros establecidos; sin embargo, dentro de las limitaciones encontradas, se destaca las muestras pequeñas de intervención, la escases de información en el estudio del sistema muscular y la diversidad de expediciones, ambientes, tiempo de estancia, temporada del año y condiciones en las que se puede generar exposición en este ambiente, dicha cuestión dificulta la unanimidad de los hallazgos y destaca que en la fisiología humana se debe considerar el contexto dentro de los resultados encontrados.





## Conclusiones

La revisión de alcance tipo scoping review, ha permitido reconocer el impacto que tienen las expediciones antárticas de diferente naturaleza en la fisiología humana, especialmente en el sistema muscular y cardiovascular; así como, en parámetros óseos y corporales en la exposición a ambiente antártico en contexto de ejercicio físico, en donde mayoritariamente el impacto fue dado por la naturaleza de las actividades de campo, o las travesías de esquí.

La Antártida no solamente es biodiversa, sino que el avance tecnológico y científico ha permitido generar variabilidad en el tipo de expediciones que se generan en este ambiente para favorecer la exposición a ciertas condiciones ICE. Dichas exploraciones reguladas por acuerdos internacionales varían en duración (semanas, meses a un año), temporada del año (invierno, verano), condiciones (aislamiento, confinamiento, temperatura extrema, estrés físico y psicológico), estancia (barcos, campamentos, estaciones de investigación); todo esto hace que la Antártida sea el laboratorio natural, especialmente para la exploración espacial futura.

En cuanto al sistema muscular es fundamental destacar que se reconoció un déficit en los hallazgos fisiológicos, una oportunidad para generar investigaciones sobre el músculo esquelético. Aun así, las expediciones cortas y de media duración (30 días a 40 semanas) pueden generar aumentos significativos en la fuerza muscular; aunque no es una relación causal al impacto del ambiente, se sabe que depende del estímulo mecánico que se genera en la misión, de la forma en la que se realizan los desplazamientos y podría estar relacionado con el aumento de la composición magra del peso. En relación con este

sistema, el tejido óseo mostró la importancia de la estimulación mecánica en las misiones antárticas, ya que estas expediciones generan una disminución estadísticamente significativa en la DMO en estructuras centrales como la columna vertebral y el tronco aún en expediciones de esquí (en donde se genera una mayor actividad física), resaltando la importancia del ejercicio físico antes, durante y después de una expedición antártica debidamente planificado y la suplementación dietaria de vitamina D especialmente para expediciones de un año invernal.

El sistema cardiovascular a partir de la medición de la variabilidad de la frecuencia cardiaca principalmente, ha indicado que en misiones antárticas tanto de barco como en campamento, la VFC disminuye la respuesta parasimpática del corazón, lo cual repercute en la dificultad de recuperarse, el aumento de estrés, mayor fatiga y lo que implica un alto impacto en el rendimiento de los investigadores y expedicionarios; en un ambiente extremo como lo es la Antártida, estas respuestas podrían impactar la supervivencia misma.

Finalmente, los efectos en la aptitud física son variados y dependen de la condición física previa, a partir de la medición del VO<sub>2</sub>max, dependiendo del rol ejercido en una misión, de la masa magra, de la especificidad de los estímulos con que se evalúa, del nivel de actividad física previa, de la expedición misma, así es que un expedicionario Antártico puede aumentar o disminuir su VO<sub>2</sub>max posterior a una misión. A su vez, el análisis de la fisiología cardiovascular y muscular del ejercicio en las expediciones antárticas aún es limitado, es necesario generar más estudios con muestras más grandes y protocolos estandarizados para obtener conclusiones más robustas, generar protocolos de ejercicio físico durante las expediciones antárticas como el programa de yoga que en esta revisión fue incluido, lo que fomente la potencialización del rendimiento humano en la Antártida para que sea extrapolado a otros espacios.

## Recomendaciones y perspectivas

Los protocolos de ejercicio físico realizados como contra medida para las expediciones antárticas no son claros, lo cual dificulta el establecimiento de guías instructivas para la preparación, el mantenimiento y la recuperación de la condición física antes, durante y después respectivamente de una expedición a este ambiente extremo.

En la revisión de alcance, se evidenció que las investigaciones que relacionaban ejercicio utilizaban la naturaleza propia de la expedición tales como, las caminatas en actividades de campo, las travesías de esquí y la rutina diaria para evaluar la respuesta fisiológica de los expedicionarios; sin embargo, no se encontró la experimentación de ejercicio físico, estructurado, planificado e individualizado en ninguna de las expediciones.

Por su parte, la estación espacial internacional si presenta protocolos con herramientas diseñadas y adecuadas que repercuten en el mantenimiento de la condición física y la contramedida fisiológica del ejercicio en vuelos espaciales; por el contrario, aún no se identifica protocolos de ejercicio establecidos, ni explorados en misiones antárticas como contramedidas al impacto que genera el ambiente por sí mismo en la exposición; en consecuencia, la Antártida al ser un análogo espacial debe ser el entorno y el lugar adecuado para generar nuevos protocolos que sean replicados por su impacto en la salud y la mejora del rendimiento de los expedicionarios y tripulantes.

A partir de esto, se recomienda generar investigaciones que comprueben el impacto de un protocolo diseñado y aplicado en la Antártida con herramientas de fácil acceso como lo son las bandas de resistencia para el mantenimiento de la resistencia muscular, los ejercicios de auto carga que no impliquen un espacio amplio ni el transporte de elementos de preparación física y metodologías basadas en la individualización de la carga del entrenamiento de acuerdo a las necesidades musculares y cardiovasculares del expedicionario para estancias en barcos, campamentos y estaciones sin accesibilidad a gimnasios; así mismo, la selección de ejercicios adecuados de acuerdo a las necesidades de las tareas a cumplir. En este caso los entrenamientos pre antárticos serían el espacio adecuado para generar actividades físicas basadas en las funciones a cumplir y favorecer una adherencia al ejercicio que impacte antes, durante y después de una misión.

Adicionalmente, algunas estaciones de investigación antárticas cuentan con Gimnasios, Colombia con la cooperación de Argentina, puede acceder a bases como Belgrano II, Carlini, Esperanza, Marambio, Orcadas, Petrel y San Martín que desde el 2022 cuentan con gimnasios con herramientas muy completas para cumplir objetivos a partir de las necesidades físicas del expedicionario; caminadoras para el mantenimiento de la resistencia cardiovascular, máquinas isocinéticas para el mantenimiento de la fuerza y resistencia muscular, pesos libres para el desarrollo de actividades funcional, que además de impactar en el rendimiento físico del expedicionario, aporta en el control de su peso y adicionalmente en el manejo psicológico frente a la exposición antártica.

Finalmente, es fundamental destacar el privilegio que tiene Colombia con espacios poco utilizados para el entrenamiento pre antártico, acceder a los diferentes parques naturales, nevados y senderos de fácil acceso, para la realización de actividades de trekking y hiking cumpliendo objetivos adicionales como el trabajo en equipo, la toma de decisiones, la resolución de problemas favorecería estas expediciones que en nuestro contexto ya generan una exposición a condiciones ambientales extremas como es la exposición a la hipoxia hipobárica, las bajas temperaturas en páramos y nevados, escenarios de montaña entre otros.

## Bibliografía

1. Agenda\_Antartica.pdf [Internet]. [citado 21 de junio de 2023]. Disponible en: [https://cco.gov.co/docs/publicaciones/Agenda\\_Antartica.pdf](https://cco.gov.co/docs/publicaciones/Agenda_Antartica.pdf)
2. Wainschenker P. Compilación de documentos fundamentales del sistema del Tratado Antártico. Quinta edición.
3. reporte\_crucero\_f.pdf [Internet]. [citado 10 de noviembre de 2023]. Disponible en: [https://cco.gov.co/docs/antartico/reporte\\_crucero\\_f.pdf](https://cco.gov.co/docs/antartico/reporte_crucero_f.pdf)
4. Comisión Colombiana del Océano [Internet]. [citado 27 de enero de 2024]. Disponible en: <https://cco.gov.co>
5. de Navío C, Parra RRT. Informe de la III Expedición Científica de Colombia a la Antártida “Almirante Padilla”, Verano Austral 2016-2017.
6. informe-almirante-tono.pdf [Internet]. [citado 10 de noviembre de 2023]. Disponible en: <https://cco.gov.co/docs/antartico/informe-almirante-tono.pdf>
7. Moraes MM, Hudson ASR, Martins YAT, Marques AL, Bruzzi RS, Mendes TT, et al. Exploring the Predeployment Phase of an Antarctic Expedition and the Brazilian Pre-Antarctic Training. *Military Medicine*. septiembre de 2022;(9):264-71.
8. Hattersley J IC, Wilson AJ, Gifford R, Facer Childs J, Stoten O, Cobb R, Thake CD, Reynolds RM, Woods D. A comparison of the metabolic effects of sustained strenuous activity in polar environments on men and women.
9. Moraes MM, Mendes TT, Martins YAT, Espinosa CN, Maluf CB, Soares DD, et al. The changes in maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2MAX}$ ) induced by physical exertion during an Antarctic expedition depend on the initial  $\dot{V}O_{2MAX}$  of the individuals: a case study of the Brazilian expedition. *International Journal of Circumpolar Health*. 1 de enero de 2018;77(1):1521244.
10. Scott JPR, Weber T, Green DA. Introduction to the Frontiers Research Topic: Optimization of Exercise Countermeasures for Human Space Flight – Lessons From Terrestrial Physiology and Operational Considerations. *Frontiers in Physiology* [Internet]. 2019 [citado 21 de junio de 2023];10. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00173>
11. Strewe C, Thieme D, Dangoisse C, Fiedel B, van den Berg F, Bauer H, et al. Modulations of Neuroendocrine Stress Responses During Confinement in Antarctica and the Role of Hypobaric Hypoxia. *Frontiers in Physiology* [Internet]. 2018 [citado 10

- de noviembre de 2023];9. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2018.01647>
12. Feuerecker M, Crucian BE, Quintens R, Buchheim JI, Salam AP, Rybka A, et al. Immune sensitization during 1 year in the Antarctic high-altitude Concordia Environment. *Allergy*. enero de 2019;74(1):64-77.
  13. Novus Biologicals [Internet]. [citado 10 de noviembre de 2023]. Detecting HIF alpha and beyond: Best controls for hypoxia Western blot analysis. Disponible en: <https://www.novusbio.com/antibody-news/detecting-hif-alpha-and-beyond-best-controls-for-hypoxia-western-blot-analysis>
  14. Vargas Pinilla OC. Exercise and Training at Altitudes: Physiological Effects and Protocols. *Rev Cienc Salud*. 16 de enero de 2014;12(1):115-30.
  15. Chiurchiù V, Battistini L, Maccarrone M. Endocannabinoid signalling in innate and adaptive immunity. *Immunology*. marzo de 2015;144(3):352-64.
  16. Porcelli S, Marzorati M, Healey B, Terraneo L, Vezzoli A, Bella SD, et al. Lack of acclimatization to chronic hypoxia in humans in the Antarctica. *Sci Rep*. 22 de diciembre de 2017;7(1):18090.
  17. Moraes MM, Bruzzi RS, Martins YAT, Mendes TT, Maluf CB, Ladeira RVP, et al. Hormonal, autonomic cardiac and mood states changes during an Antarctic expedition: From ship travel to camping in Snow Island. *Physiology & Behavior*. octubre de 2020;224:113069.
  18. MANTOVANI H, ZANETTI GO, SIMÕES CB, VIEIRA TS, PESSOA PWM, WANNER SP, et al. INTERMITTENT CHRONIC COLD EXPOSURE CAUSES SKELETAL MUSCLE ATROPHY AND IMPAIRS AEROBIC PHYSICAL PERFORMANCE WITHOUT CHANGING PGC-1A IN MICE. *Evidência*. 2022;22(2):429-30.
  19. Nirwan M. Human psychophysiology in Antarctica. *Sri Ramachandra Journal of Health Sciences (SRJHS)*. enero de 2022;2(1):12-8.
  20. Sletten TL, Sullivan JP, Arendt J, Palinkas LA, Barger LK, Fletcher L, et al. The role of circadian phase in sleep and performance during Antarctic winter expeditions. *J Pineal Res*. 1 de septiembre de 2022;73(2):e12817.
  21. PRISMA-ScR\_TipSheet\_Item14.pdf [Internet]. [citado 4 de julio de 2024]. Disponible en: [https://knowledgetranslation.net/wp-content/uploads/2019/05/PRISMA-ScR\\_TipSheet\\_Item14.pdf](https://knowledgetranslation.net/wp-content/uploads/2019/05/PRISMA-ScR_TipSheet_Item14.pdf)
  22. Balakrishnan R, Nanjundaiah RM, Nirwan M, Sharma MK, Ganju L, Saha M, et al. Design and validation of Integrated Yoga Therapy module for Antarctic expeditioners. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*. abril de 2020;11(2):97-100.
  23. Koschate J, Möller F, Haeger M, Hoffmann U, Drescher U, Fomina E, et al. Effects of aerobic exercise in confinement on cardiorespiratory kinetics and cognitive functions – Results from the 4-month SIRIUS-19 isolation project. *Acta Astronautica*. noviembre de 2022;200:270-81.

24. O'Brien KA, HSDR Pollock RD, Stroud M, Lambert RJ, Kumar A, Atkinson RA, Green DA, Anton Solanas A, Edwards LM. Human physiological and metabolic responses to an attempted winter crossing of Antarctica: the effects of prolonged hypobaric hypoxia.
25. Fernández-Riestra FA, Garcés C, Lahoz C, Lasunción MA, Castilla P, Viturro E, et al. Metabolic adaptation in the crew of the Hesperides on their Antarctic journey. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. octubre de 2006;16(7):494-9.
26. O'Leary TJ, Gifford RM, Double RL, Reynolds RM, Woods DR, Wardle SL, et al. Skeletal responses to an all-female unassisted Antarctic traverse. *Bone*. abril de 2019;121:267-76.
27. Parent AA, Martin D, Morales S, Boucher J, Comtois AS. XP-Antarctik Expedition: The Effect of a Month-Long Expedition in Antarctica on Physiological Performance. *Journal of Human Performance in Extreme Environments* [Internet]. 29 de junio de 2018 [citado 5 de junio de 2024];14(1). Disponible en: <https://docs.lib.purdue.edu/jhpee/vol14/iss1/10>
28. Van Ombergen A, Rossiter A, Ngo-Anh TJ. 'White Mars' – nearly two decades of biomedical research at the Antarctic Concordia station. *Experimental Physiology*. 2021;106(1):6-17.
29. Brent MB. A review of the skeletal effects of exposure to high altitude and potential mechanisms for hypobaric hypoxia-induced bone loss. *Bone*. enero de 2022;154:116258.
30. Villada FAP. UNIVERSIDAD DE LEÓN DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOMÉDICAS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE.
31. Simpson A, Maynard V. A longitudinal study of the effect of Antarctic residence on energy dynamics and aerobic fitness. *International Journal of Circumpolar Health*. 31 de enero de 2012;71(1):17227.
32. Simpson A, Maynard V. A longitudinal study of the effect of Antarctic residence on energy dynamics and aerobic fitness. *International Journal of Circumpolar Health*. 31 de enero de 2012;71(1):17227.
33. Martins Y a. T, Passos RLF, Marques AL, Gonçalves D a. P, Mendes TT, Núñez-Espinosa C, et al. A 32-day long fieldwork in Antarctica improves heat tolerance during physical exercise. *An Acad Bras Ciênc*. 28 de febrero de 2022;94:e20210593.
34. Maggioni MA, Merati G, Castiglioni P, Mendt S, Gunga HC, Stahn AC. Reduced vagal modulations of heart rate during overwintering in Antarctica. *Scientific Reports*. 11 de diciembre de 2020;10(1):1-9.





