

# *Somatic marker and decision making in operators of Remotely Piloted Aircraft Systems RPAS\**

María Alejandra Corzo Zamora\*\*

Alexander Díaz Ariza\*\*\*

Nohora Inés Rodríguez Guerrero\*\*\*\*

\* Artículo de investigación derivado del proyecto *Respuestas fisiológicas y funcionamiento Neuropsicológico en toma de decisiones de operadores de Aeronaves Remotamente Tripuladas Scan-Eagle de la Fuerza Aérea Colombiana* (2017-2019). Invitación directa FAC-Colciencias 2017 con código 56714.

\*\* Magíster en Fisiología y Salud Espacial. Centro de Investigaciones Biomédicas Aeronáuticas y Espaciales de la Fuerza Aérea Colombiana. Orcid: 0000-0002-6462-6745 | Correspondencia: [alejandracorzo.sph@gmail.com](mailto:alejandracorzo.sph@gmail.com)

\*\*\* Magíster en Neuropsicología. Dirección de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana. Orcid: 0000-0002-0848-6063 | Correspondencia: [adiaz7@gmail.com](mailto:adiaz7@gmail.com)

\*\*\*\* Magíster en Epidemiología Clínica. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Orcid: 0000-0002-2064-639X | Correspondencia: [nirodrigu21@gmail.com](mailto:nirodrigu21@gmail.com)

# Marcador somático y toma de decisiones en operadores de Aeronaves Remotamente Tripuladas\*

Cómo citar este artículo: Corzo, M.A., Díaz, A., & Rodríguez, N.I. (2020). Marcador somático y toma de decisiones en operadores de Aeronaves Remotamente Tripuladas. *Tesis Psicológica*, 15(1), 126-147. <https://doi.org/10.37511/tesis.v15n1a7>

Recibido: noviembre 12 de 2019

Revisado: noviembre 15 de 2019

Aprobado: junio 4 de 2020

## ABSTRACT

**Background:** The remote interface of the remotely piloted aircraft systems RPAS reduces the direct perception of the operational environment causing a human mistake in about 35% of the reported security events. For this reason, the study of its operators' decision-making is necessary. **Objective:** To describe the neuropsychologic functioning and the associated physiologic associated responses that participate in the RPAS operators' decision-making to establish differences between operators according to their experience time on the equipment operation. **Methodology:** This was a non-experimental, cross-sectional correlational-causal study. Physiological monitoring of electrodermal activity (EDA), heart rate variability (HRV) and electroencephalogram (EEG) were performed in missions in the simulator of ScanEagle, and the frontal lobe and executive function neuropsychology battery (BANFE-2) along with the Iowa Gambling Task (IGTv2) were administered to evaluate decision making. **Results:** Seventeen 28±2.7-year-old male operators were evaluated. The operators with less than 500 flight hours present a frontal brain activity of dorsolateral predominance with reflexive thought, whereas those with more than 500 flight hours present a frontal brain activity of medial and orbital predominance with automatic thought and intuitive decision making. A relation was found between the execution time during simulated missions, the performance in IGTv2 and the EDA. **Conclusion:** The EDA is identified as the operators' somatic marker that can allow the evaluation of the decision making, the monitoring of training to foster a more intuitive thought with fewer flight hours, and the development of systems of early risk warning as an assistant in decision making during the operation.

**Keywords:** decision making, automation, somatic marker, human factors, aerial security.

## RESUMEN

**Antecedentes:** La interfaz remota de las Aeronaves Remotamente Tripuladas (ART) reduce la percepción directa del entorno operacional propiciando el error humano en cerca del 35% de los eventos de seguridad reportados, por lo que el estudio de la toma de decisiones de sus operadores es necesario. **Objetivo:** Describir el funcionamiento neuropsicológico y las respuestas fisiológicas asociadas que participan en la toma de decisiones en los operadores de ART para establecer las diferencias entre los operadores según su tiempo de experiencia en la operación del equipo. **Método:** Estudio no experimental, de corte transversal correlacional-causal. Se realizó monitoreo fisiológico de actividad electrodérmica (EDA) y variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), y electroencefalográfico (EEG) en misiones del simulador de Scan-Eagle, y se administró la batería BANFE-2 e IGTv2 para evaluar la toma de decisiones. **Resultados:** 17 operadores masculinos de 28±2.7 años fueron evaluados. Los operadores con < 500 horas de vuelo presentan una actividad cerebral frontal de predominio dorsolateral con pensamiento reflexivo, y aquellos con > 500 horas de vuelo presentan una actividad cerebral frontal de predominio medial y orbital con pensamiento automático y toma de decisiones intuitiva. Se encontró relación entre los tiempos de ejecución durante las misiones simuladas, el desempeño en IGTv2, y la EDA. **Conclusión:** La EDA se identifica como marcador somático en los operadores que puede permitir la evaluación de la toma de decisiones, el seguimiento de entrenamientos para propiciar un pensamiento más intuitivo a menor horas de vuelo y el desarrollo de sistemas de detección temprana de riesgo como asistencia en la toma de decisiones durante la operación.

**Palabras clave:** toma de decisiones, automatización, marcador somático, factores humanos, seguridad aérea.

## Introducción

La actividad aeronáutica en general reviste una especial complejidad debido a la interacción del individuo (piloto) con los sistemas de cabina y con las actividades de la misión. En el campo de la aviación a nivel mundial, es bien conocido que el factor humano está implicado en la génesis de accidentes en aeronaves tripuladas, siendo el elemento más vulnerable de la operación aérea; se calcula que su participación en la accidentalidad se encuentra entre el 70% y 80% de los casos de accidentes aéreos (Weigmann & Shapell, 1997; Kelly & Efthymiou, 2019).

De acuerdo con Wenjuan, Feltner, Shirley, Swangnetr y Kaber (2016), se calcula que los factores humanos representan entre el 21% y el 67% de los accidentes aéreos dependiendo el equipo implicado. Entre los factores humanos identificados se incluyen errores procedimentales y aquellos basados en habilidades, lo que genera una inadecuada manipulación de las aeronaves (Kelly & Efthymiou, 2019). En un reporte realizado por la Administración de la Aviación Federal de los Estados Unidos (FAA) se describe como causa de la ocurrencia de accidentes aéreos –en la categoría de factores humanos en la aviación– los errores de decisión, los cuales representan el segundo porcentaje más alto (Weigmann & Shapell, 2001).

Aunque a nivel mundial el número de accidentes de aviación ha disminuido en los últimos 20 años, se ha observado que esta disminución responde más a las actividades de prevención relacionadas con factores mecánicos o medioambientales, que a las de reducción del error humano (Weigmann & Shapell, 2001). Esto ha llevado a una constante búsqueda de estrategias para la reducción de eventos que ponen en riesgo la seguridad aérea, entre las que se incluyen la automatización y el desarrollo de Aeronaves

Remotamente Tripuladas (ART) (Wild, Gavin, Murray, Silva & Baxter, 2017).

Las ART son operadas desde tierra a través de una interfaz gráfica, sin embargo, esta modalidad de operación no está exenta de accidentes. Estos equipos reciben diferentes nombres dependiendo su tamaño y campos de uso entre los que se encuentran: drones, vehículos aéreos no tripulados y Aeronaves Remotamente Tripuladas (Wild, Murray & Baxter, 2016), para el presente artículo se utilizará el término Aeronave Remotamente Tripulada (ART) que corresponde a su uso en el campo militar con diferente tipo de aplicaciones. Durante la operación de ART los operadores están expuestos a una alta demanda de tareas y tiempos prolongados, esto puede comprometer el cumplimiento de la misión y por ende incrementar el riesgo de accidentes (Murray & Park, 2013; Wild et al., 2017). En general, los riesgos de la operación de ART para los seres humanos se enmarca en dos tipos: colisiones con otra aeronave y con personas en la superficie de la tierra (Wild et al., 2016), por lo anterior el estudio de sus orígenes, el desarrollo de alternativas de entrenamiento y sistemas de detección temprana de errores se convierte en una herramienta fundamental para incrementar constantemente la seguridad de su operación.

En lo que respecta a las causas de accidentalidad en ART Tvaryanas, (2006) afirma que entre el 33% y 43% de los accidentes se presentan debido a factores humanos; así mismo, procesos como la selección y entrenamiento de operadores, errores en el trabajo en equipo, y factores neurocognitivos y de destreza del piloto, están más relacionados con los índices de accidentalidad en estos equipos. De igual manera, un estudio realizado por Wild et al. (2016), en el que se analizaron 152 eventos de seguridad aérea, se encontró que el 74% de ellos fueron incidentes y el 26% accidentes, siendo el error

humano la causa del 34% del total de los eventos. En Colombia, en un estudio realizado por López y Malpica, (2013) se encontró que el 62% de los accidentes se debía a la gestión inadecuada de recursos, planeación inadecuada del trabajo, factores ambientales, errores del operador, y violaciones rutinarias; hallazgos similares a lo reportado en estadísticas mundiales de accidentalidad aérea (Lopez & Malpica, 2013; Thompson, Tvaryanas & Constable, 2005). López y Malpica (2013) afirman que errores del operador, específicamente asociados a la toma de decisiones, serían responsables del 10.2% de la accidentalidad en ART. Sin embargo, a la fecha son pocos los estudios publicados sobre la identificación de los factores que influyen en la accidentalidad de la operación de ART, así como sobre las estrategias para lograr su reducción, comparados con los de la aviación tripulada.

La operación de ART en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha aumentado en los últimos años. Por tanto, contar con operadores que tengan la capacidad de hacer una evaluación y análisis exacto de la información para tomar una decisión adecuada ayudaría a disminuir la probabilidad de perder costosos equipos de vuelo para la Institución.

La toma de decisiones es una actividad continua en el ser humano en todas las áreas de la vida y se convierte en una tarea compleja que en ocasiones genera preocupación; involucra numerosos procesos cognitivos como el procesamiento de los estímulos presentes en la tarea, el recuerdo de las experiencias anteriores y la estimación de las posibles consecuencias de las diferentes opciones. Todo este proceso requiere de la memoria de trabajo y en conjunto de las funciones ejecutivas las cuales orientan a una toma de decisiones basado en la integración de ideas y acciones que se localizan a nivel de la corteza dorsolateral, orbitofrontal y frontomedial de la corteza frontal (Bechara, Damasio & Damasio,

2000; Martínez-García, Merchán-Clavellino, Sánchez & Gómez-Molinero, 2019).

De acuerdo con Damasio (1994) razonar es decidir y la esencia de la decisión es la selección de una respuesta entre varias opciones en relación con una situación determinada. Razonar y decidir están estrechamente vinculados, por lo que con frecuencia se usan ambos términos indistintamente. Razonar y decidir suponen con frecuencia que quien toma una decisión conoce la situación que la exige, las posibles respuestas u opciones de acción, y las consecuencias inmediatas o futuras de cada una de estas.

En relación a los mecanismos implicados en el proceso de razonamiento, con frecuencia se hace mención de la atención y la memoria de trabajo u operativa, sin embargo, poco se dice de la implicación de la emoción y el sentimiento, o sobre los mecanismos que generan diferentes opciones para ser seleccionadas (Damasio, 1994; Bechara et al., 2000; Martínez-García et al., 2019; Sandor & Gürvit, 2019).

Damasio (1994) afirma que no todos los procesos biológicos que culminan en una selección de respuesta pertenecen al ámbito racional-decisorio; las reacciones rápidas y automáticas que no requieren de esfuerzo ni de deliberación son ejemplo de esto. El mismo investigador propone que los centros específicos en el cerebro que se refieren a la sensación de ciertos estados corporales resultantes de respuestas emocionales en una situación, generan los llamados “marcadores somáticos” que ayudan a hacer una selección de opciones viables para la acción. Este proceso guía involuntariamente la decisión, de manera que una decisión compleja puede ser atendida por la intuición.

En un estudio sobre modelización de la intuición de un piloto de combate en la toma de decisiones sobre la base de la hipótesis del marcador

somático realizado por Hoogendoorn, Merk, Roessingh y Treur (2009) se ofrece una comprensión acerca de cómo los seres humanos logran resolver los problemas de decisión complejos de una manera relativamente eficiente. Los pilotos de combate en gran medida dependen del tipo de experiencias, agregados que constituyen su intuición y que les permite mantenerse separados de sus enemigos y atacarlos desde el ángulo correcto. Al mismo tiempo, deben poder coordinar con sus compañeros de vuelo la formación y la separación entre aeronaves, y todo esto en unos pocos segundos. Sus consideraciones de la situación táctica, las posibles maniobras y acciones, y el resultado deseado de la situación no proceden de forma racional. Estas decisiones y evaluaciones se generan inconsciente e intuitivamente (Sandor & Gürvit, 2019).

Contreras, Catena, Cándido, Perales & Maldonado (2008), describen que la VMPFC ha sido implicada en la toma de decisiones emocionales debido a su posible participación en el aprendizaje de inversión afectivo, la propensión al riesgo, y la impulsividad. Sus conexiones con otras áreas de la corteza y con estructuras subcorticales como la amígdala justifican que pueda tener un papel de interface entre cognición y emoción, así como participar en la regulación y el control del comportamiento.

En el trabajo de Contreras et al. (2008) se efectuó una revisión de estudios con la tarea de apuestas de Iowa, tareas de aprendizaje de inversión afectivo, tareas de apuestas con diferente varianza para medir la propensión al riesgo, y tareas que introducen demora temporal de la recompensa para evaluar la impulsividad. Los datos obtenidos en esos trabajos con pacientes lesionados en la corteza VMPFC o en otras áreas pre-frontales frente a controles no lesionados, arrojaron datos conductuales y de actividad cerebral en los que se asume que la VMPFC se encarga de representar la expectativa de refuerzo.

Teniendo en cuenta la implicación del factor humano en la operación de ART, y en particular de la toma de decisiones, la presente investigación busca caracterizar y correlacionar respuestas fisiológicas (psicofisiológicas y neurofisiológicas) y neuropsicológicas durante la toma de decisiones en situaciones de confort y emergencia de operadores de ART Scan-Eagle de la FAC. Esto con el fin de identificar los factores inherentes a cada individuo que pueden ser determinantes en la toma de decisiones y por ende en el éxito operacional de las misiones de ART, información útil para el diseño de estrategias de entrenamiento y sistemas de detección temprana del riesgo en este personal encaminados a disminuir la presentación de eventos de seguridad aérea durante la operación.

En este trabajo se parte de la hipótesis del marcador somático (Damasio, 1994) y su incidencia en el proceso de toma de decisiones, entendiendo que éste involucra procesos motivacionales y emocionales que tienen lugar en niveles de procesamiento pre-racionales (Márquez, Salguero, Paino & Alameda, 2013; Morandín-Ahuerma, 2019). Así, se busca determinar si la toma de decisiones de operadores de ART se produce bien en un nivel de procesamiento superior, racional, y por tanto bajo la influencia de los conocimientos previos del sujeto; o bien, en niveles anteriores que se podrían considerar pre-racionales. Lo anterior, teniendo en cuenta que la operación de ART requiere de una toma de decisiones rápida, en especial en momentos de emergencia, y en ocasiones, en escenarios sin mucha información proveniente de los sentidos debido a que el operador no se encuentra observando de forma directa el campo en el que se desempeña, momento en el cual las reacciones del organismo a través de marcadores somáticos pueden proveer señales de importancia para asistir a la toma de decisiones (TenHouten, 2016).

## Metodología

### Diseño

Se realizó un estudio no experimental, de corte transversal correlacional-causal. Las variables de estudio fueron seleccionadas basadas en estudios previos. Cabe anotar que no se encontró en la literatura un diseño igual al que acá se presenta ni tampoco aplicado a la población de estudio. Basado en la teoría del marcador somático formulada por Damasio (1994) y estudios posteriores realizados en pilotos de combate (Hoogendoorn et al., 2009) se definieron las siguientes variables de estudio: variabilidad de la frecuencia cardíaca (Poppa & Bechara, 2018), actividad electrodérmica (Mojica-Londoño, 2017), onda Alfa, Beta y Gama mediante Electroencefalografía (Lutzenberger, Ripper, Busse, Birbaumer & Kaiser, 2002; Chen, Meichsner, Zou & Zhao, 2010), % de Percepción de contingencias de refuerzo y castigo del Iwoa Gambling Task IGTv2 (Contreras et al., 2008), Tscore de la Bateria de funciones ejecutivas (BANFE-2) (Lázaro, Solís & Lozano, 2008). Estas variables en conjunto permiten la evaluación integral de la vía de integración y retroalimentación de la hipótesis del marcador somático (Poppa & Bechara, 2018).

### Población y muestra

Muestra conformada inicialmente por 22 operadores militares de ART Scan-Eagle. La selección de los participantes se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia debido a que la población es operativa y su alta movilidad y rotación por situaciones del servicio y de desplazamiento al sitio de evaluación no permite el cálculo de una muestra por medios probabilísticos. Los criterios de inclusión fueron tener una aptitud psicofísica para actividades de operación de ART vigente (exámenes médicos y

psicológicos realizados para actividades de vuelo) y como exclusión no haber completado la simulación de vuelo por interferencia o ayuda del instructor durante la sesión. Los registros de cinco participantes fueron excluidos por no cumplir los requisitos durante la simulación, por lo que finalmente se incluyeron en el estudio datos de 17 operadores con edad promedio de  $28 \pm 2,7$  años, todos de sexo masculino, con un promedio de  $404,64 \pm 291,54$  horas de vuelo en Scan-Eagle. El 70% de los evaluados eran operadores activos (n:12), 17% de los operadores eran instructores (n:3), y el 11% alumnos avanzados (n:2).

### Instrumentos

**Registros psicofisiológicos y neurofisiológicos.** Se empleó el sistema BIOPAC (MP150, BIOPAC System Inc., USA) para adquirir señales de electrocardiografía y actividad electrodérmica mediante el módulo PPGE Bionomadix y el software Acknowledge 5 BIOPAC®. Adicionalmente, se registró la actividad cerebral mediante el equipo B-alert X10 (Advance Brain Monitoring compatible con Biopac®). Ambos equipos contaban con calibración de fábrica y con grabación de variables preconfiguradas. Sin embargo, se realizaron pruebas para estandarizar los canales a utilizar al acoplar ambos equipos.

Se realizó un análisis de los parámetros ambientales de intensidad de luz y ruido, temperatura y humedad, mediante los equipos luxómetro Lutron® LX-1128SD, sonómetro digital datalogger II 94405, y termohigrómetro RHT20 Extech®.

**Funcionamiento neuropsicológico.** Para la evaluación del funcionamiento neuropsicológico orientado a la toma de decisiones, se realizó una búsqueda de pruebas para los fines propios del proyecto. A continuación, se describen las baterías seleccionadas y las razones de su elección.

**BANFE-2 Batería Funciones Ejecutivas** (Lázaro et al., 2008). Evalúa los procesos cognitivos que dependen principalmente de la corteza prefrontal, como las funciones ejecutivas. Esta batería consta de 14 pruebas con validez convergente y clínica, con una confiabilidad de .80 y alta validez de constructo; proporciona un índice general de desempeño de tres áreas prefrontales: orbitomedial, dorsolateral y prefrontal anterior; y funciones específicas, a partir de puntuaciones normalizadas de las pruebas (1 a 10).

Esta prueba se eligió debido a que permite tener un perfil general del funcionamiento de corteza prefrontal en la toma de decisiones y permite evaluar una posible correspondencia con los resultados obtenidos del monitoreo cerebral. Cabe anotar que la BANFE-2 tiene incluida una adaptación de la prueba de juego de cartas, lo que permite validar mejor los resultados obtenidos en la investigación. Sin embargo, para propósitos de la presente investigación, esta subprueba de la BANFE-2 no fue evaluada de forma individual, ya que se utiliza el IGTv2 que cuenta con mayor validez. De igual manera para propósitos de la presente investigación, no se realizó un análisis detallado de las capacidades asociadas al funcionamiento ejecutivo.

**IOWA Gambling Task v2 PAR Inc (IGTv2):** (Bechara, Damasio, Damasio & Anderson, 1994). Es una tarea computarizada para la evaluación de la toma de decisiones. En ésta se presentan cuatro mazos de cartas etiquetadas con las letras A, B, C y D. Se informa al participante que el objetivo de la tarea consiste en ganar la mayor cantidad de dinero posible, para lo cual debe escoger libremente cartas de estos mazos, siendo algunos de ellos más ventajosos que otros. Los mazos A y B proporcionan altas recompensas, pero también altos castigos y constituyen los mazos desventajosos. Por el contrario, los mazos C y D proporcionan ganancias más bajas, pero también castigos más pequeños y constituyen los

mazos ventajosos. Los mazos A y C presentan alta frecuencia de castigos (1 de cada 5 elecciones) mientras que en los mazos B y D la frecuencia es menor (1 de cada 10). La tarea finaliza una vez que han sido seleccionadas 100 cartas. La puntuación de la tarea se obtiene al restar el total de elecciones de los mazos desventajosos al número de elecciones de los mazos ventajosos.

Se eligió el IGTv2 (juego de cartas) por su amplia utilización y validez reconocida para la evaluación de la toma de decisiones (Aram et al., 2019), esta versión al ser sistematizada disminuye errores en la obtención de la información ya que el evaluador poco interviene en la ejecución de la prueba y el evaluado no es reactivo al lenguaje no verbal del examinador; adicionalmente, su sistematización permite tener los registros más precisos de tiempos de ejecución y por tanto un mejor análisis de la toma de decisiones.

## Procedimiento

El presente estudio contó con el aval del Comité de ética de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana mediante acta No. 001 de 2017. Todos los sujetos participaron voluntariamente y firmaron un consentimiento informado. Se les informó que podían desistir en cualquier momento de su participación, que los datos serían codificados mediante números para evitar la identificación de los participantes, siendo los datos de carácter confidencial.

En primer lugar, se procedió con la identificación de escenarios de confort y riesgo en la operación de ART, los cuales fueron utilizados para la configuración del simulador Scan-Eagle. Los escenarios fueron estandarizados por instructores de la Escuela Básica de Aeronaves Remotamente Tripuladas (EBART). Inicialmente, se identificaron los escenarios más comunes utilizados en instrucción, posteriormente, se seleccionaron cinco, de los cuales dos, representan

escenarios tranquilos o de confort, y tres, escenarios en los cuales la toma de decisiones en emergencia es esencial. En la tabla 1, se listan los escenarios escogidos y su posterior categorización para análisis en escenario de confort y escenario de emergencia:

**Tabla 1. Escenarios de la simulación y categorías para análisis**

Código	Escenario	Categoría
1	Chequeo del Sistema y despegue	Confort
2	Chequeo comunicaciones	Emergencia
3	Falla Generador	Emergencia
4	Skyhook	Emergencia
5	Aterrizaje y fin de simulación	Confort

Fuente: autores

Posteriormente, se invitó a los operadores de ART que asistieron a su curso de repaso anual y a los candidatos a operador de ART en fase avanzada de aprendizaje en la Escuela Básica de ART de la FAC entre el 01 de febrero de 2018 y el 31 de octubre de 2018 a participar en la investigación. El ingreso como participante se realizó posterior a la firma del consentimiento informado y cada uno fue identificado con un código Alfa-numérico durante el estudio. Se registró información sociodemográfica de los participantes incluyendo el equipo de ART que operaba, horas totales de operación en ART, operación previa de aeronaves tripuladas, y horas de vuelo en aeronaves tripuladas.

A continuación, los participantes fueron expuestos a la simulación de los diferentes escenarios, esto es confort y riesgo en la operación de ART Scan-Eagle utilizando el simulador de Scan-Eagle presente en la EBART; y se les pidió realizar las pruebas neuropsicológicas BANFE-2 e IGTv2, que fueron aplicadas en orden aleatorio a cada participante para evitar sesgos.

Durante la simulación se realizó monitoreo de variables fisiológicas autonómicas, variabilidad de frecuencia cardiaca (HRV) y actividad electrodérmica (EDA) utilizando el equipo Bionomadix (BIOPAC®), y de la actividad cerebral mediante el equipo B-alert X10 (Research Advance Monitoring®). El monitoreo se realizó durante toda la simulación en el momento que los voluntarios fueron expuestos a los escenarios de confort y riesgo definidos. También se instalaron dos cámaras de video GO PRO las cuales se activaron en simultáneo para grabar las diferentes respuestas y decisiones tomadas durante la simulación; y se monitorearon variables ambientales como la intensidad de luz y ruido, temperatura y humedad. Los datos quedaron automáticamente grabados en tiempo real en el software Aqknowledge (receptor del sistema BIONOMADIX).

Los resultados de la grabación fisiológica fueron analizados y convertidos a valores numéricos utilizando el software AqKnowledge (del sistema BIOPAC-BIONOMADIX) y Labchart (AD-INSTRUMENTS®) y exportados a Excel para análisis estadístico en bloques según el escenario de simulación realizado. Las áreas de activación cerebral fueron analizadas utilizando la herramienta EEGLAB V4.3 desarrollado por el Swartz Center for Computational Neuroscience® en MATLAB R2018b.

### Análisis de datos

Se realizó un análisis descriptivo de los resultados obtenidos en relación con las áreas cerebrales de procesamiento ejecutivo, respuestas fisiológicas y toma de decisiones en la misión mediante medidas de tendencia central. Los datos fueron agrupados por rango de horas de operación del equipo.

Para el análisis de las variables derivadas de las pruebas BANFE-2, IGTv2 y variables ambientales, se realizó un análisis intergrupar no paramétrico con la prueba Kruskal- Wallis. Así mismo, se realizó un análisis no paramétrico en términos de variables fisiológicas evaluadas, esta se realiza teniendo en cuenta las horas de vuelo en el equipo Scan-Eagle y si existía o no un escenario de emergencia. Este análisis se realizó mediante el estadístico Kruskal- Wallis y la U Mann-Whitney como post-hoc para identificar diferencias significativas entre pares de grupos ( $p < 0.05$ , IC 95%).

Finalmente, se realizó una regresión lineal múltiple para establecer la posible predicción de las variables neuropsicológicas y fisiológicas del tiempo de ejecución de escenarios como indicador de la toma de decisiones, y determinar si alguna de las variables fisiológicas puede relacionarse como factor somático.

## Resultados

El análisis de los datos se realizó en función del número de horas de vuelo de los participantes en equipos ART Scan-Eagle agrupados en cuatro rangos como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Grupos por rangos de hora de vuelo

Grupo	Límite inferior horas de vuelo	Límite superior horas de vuelo	Nº participantes
1	15	274	5
2	275	533	8
3	534	792	2
4	793	1051	2

Fuente: autores

Se analizó el tiempo de ejecución de la tarea en los diferentes escenarios de simulación teniendo en cuenta el número de horas de vuelo en equipos Scan-Eagle de los participantes (ver Tabla 3). Se encontró que el grupo 1 tuvo el mayor tiempo de ejecución en escenarios de confort ( $23 \pm 19.43$  min) y emergencia ( $19.59 \pm 17.18$  min), mientras que el grupo 4 presentó los menores tiempos de ejecución en escenarios en confort ( $4.79 \pm 2.17$  min) y emergencia ( $8.53 \pm 2.917$  min). No se encontraron diferencias significativas intergrupales en el tiempo de ejecución en los escenarios de emergencia, a diferencia de los escenarios de confort, en los que el grupo 1 reporta un tiempo significativamente mayor que el grupo 4.

Tabla 3. Tiempos de ejecución de escenarios de confort y emergencia por grupos

Grupo	Confort	Emergencia
1	$23 \pm 19.43^*$	$19.59 \pm 17.18$
2	$13.4 \pm 14.2$	$15.98 \pm 12.03$
3	$8.37 \pm 2.49$	$10.78 \pm 5.98$
4	$4.79 \pm 2.17$	$8.53 \pm 2.917$

Datos presentados media  $\pm$  SD.

\* diferencia significativa 1:4  $p < 0.05$

Fuente: autores

## Respuestas psicofisiológicas

El análisis de las variables psicofisiológicas evaluadas se realizó teniendo en cuenta el escenario de la simulación (confort/emergencia) y el número de horas de vuelo en equipos ART Scan-Eagle. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4. Respuestas psicofisiológicas en escenarios de simulación**

	Grupos por horas de vuelo							
	1		2		3		4	
	Escenario de simulación							
	Confort	Emergencia	Confort	Emergencia	Confort	Emergencia	Confort	Emergencia
EDA $\mu$ S*	11.96 $\pm$ 6.9	12.3 $\pm$ 6.6	8.63 $\pm$ 3.45	8.3 $\pm$ 2.71	8.21 $\pm$ 2.8	8.39 $\pm$ 1.34	16.11 $\pm$ 2.281	15.6 $\pm$ 1.32*
RR ms	719.7 $\pm$ 385	927.6 $\pm$ 93.7	864.73 $\pm$ 33.6	865.86 $\pm$ 28.1	766.5 $\pm$ 226.8	811.8 $\pm$ 182	896.75 $\pm$ 52.4	911.5 $\pm$ 45.7
FC lpm	65.4 $\pm$ 6.4	65.15 $\pm$ 6.17	69.7 $\pm$ 2.55	69.68 $\pm$ 2.198	84.37 $\pm$ 25.4	78 $\pm$ 19.7	49.75 $\pm$ 33.3	55.16 $\pm$ 27.12
LF (us2)	2712.35 $\pm$ 2221	1873.52 $\pm$ 1478.98	1617.39 $\pm$ 1779.6	1159.85 $\pm$ 494	845 $\pm$ 641	1055.83 $\pm$ 845.89	2078.25 $\pm$ 594.74	2564.33 $\pm$ 614.6*
LF (%)	36.89 $\pm$ 6.93	32.95 $\pm$ 11.05	32.69 $\pm$ 10.42	32.7 $\pm$ 8.7	28.9 $\pm$ 12.6	30.8 $\pm$ 10.7	39.75 $\pm$ 9.5	46 $\pm$ 11.3*
LF (un)	50.7 $\pm$ 11	52.44 $\pm$ 10	46.9 $\pm$ 16.74	47.36 $\pm$ 15.9	64.74 $\pm$ 24.5	53 $\pm$ 22	49.25 $\pm$ 16.4	56.6 $\pm$ 8.28
HF (us2)	2425.9 $\pm$ 2302.78	1631.87 $\pm$ 1239.4	2157.4 $\pm$ 1798.97	1529.2 $\pm$ 1249.4	835.75 $\pm$ 904.56	1006.5 $\pm$ 1053	2439.25 $\pm$ 1696.7	1867.5 $\pm$ 561.54
HF (%)	35.06 $\pm$ 12	21.4 $\pm$ 69.66	37.07 $\pm$ 17.7	36.37 $\pm$ 14.89	22.66 $\pm$ 21.78	32.65 $\pm$ 21.69	42.25 $\pm$ 17	33 $\pm$ 7,56
HF (un)	46.35 $\pm$ 9.6	43.53 $\pm$ 9.36	48.23 $\pm$ 14.49	48.4 $\pm$ 13.65	32.61 $\pm$ 20.94	42.2 $\pm$ 18.7	49.25 $\pm$ 15	41 $\pm$ 6.6
LF/HF	1.17 $\pm$ 0.472	1.3 $\pm$ 0.511	1.18 $\pm$ 0.803	1.25 $\pm$ 1.174	3.64 $\pm$ 3.23	1.87 $\pm$ 1.72	1.17 $\pm$ 0.748	1.58 $\pm$ 0.504

Nota: Resultados presentados como media  $\pm$  desviación estándar. Resultados presentados como media  $\pm$  desviación estándar; \* diferencia estadísticamente significativa  $p \leq 0.05$  entre el grupo de horas 4: 2,3 en escenarios de emergencias. EDA: actividad electrodérmica. RR: intervalo R-R; FC: frecuencia cardiaca; LF (us2): Low Frequency Band (Banda Baja Frecuencia) ; LF (%): Low Frequency Band (Banda Baja Frecuencia) % ; LF (un): Low Frequency Band (Banda Baja Frecuencia) ; HF (us2): High Frequency Band (Banda de alta frecuencia); HF (%): High Frequency Band (Banda de alta frecuencia); HF (un): High Frequency Band (Banda de alta frecuencia); LF/HF: (LF/HF ratio) índice LF/HF.

Fuente: autores

En relación con la EDA, se encontró que en escenarios de confort no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ( $p > 0.05$ ). Sin embargo, se encontró diferencia significativa en los escenarios de emergencia, siendo la EDA mayor en el grupo 4 ( $15.6 \pm 1.32 \mu S$ ) en comparación con el grupo 2 ( $8.3 \pm 2.71 \mu S$ ;  $t_e = 0.18$ ) y el grupo 3 ( $8.39 \pm 1.34 \mu S$ ;  $t_e = 0$ ). Estos resultados indican que en situaciones de emergencia, a mayor número de horas de vuelo y experticia, mayor es la EDA, lo que se asocia a un incremento de la actividad simpática derivada del estrés por percepción de escenario de riesgo.

Para el intervalo RR y la Frecuencia Cardiaca (FC), no se presentaron diferencias

estadísticamente significativas al interior de cada grupo en escenarios de confort teniendo en cuenta sus horas de vuelo. Se observa como el grupo 1 registra mayor frecuencia cardiaca en confort ( $65.4 \pm 6.4$  lpm) y emergencias ( $65.15 \pm 6.17$  lpm) con menor intervalo RR ( $719.76 \pm 385.5$  ms y  $927.6 \pm 93.7$  ms) en ambos escenarios, mientras que el grupo 4 reporta en situación de confort menor frecuencia cardiaca ( $49.75 \pm 33.3$  lpm) con su correspondiente RR más alto ( $896.75 \pm 52.4$  ms) y en emergencia se observa como este grupo registra una FC muy baja ( $55.16 \pm 27.12$  lpm) con un RR =  $911.5 \pm 45.7$  ms, lo que muestra que a mayor número de horas de operación, hay mayor tranquilidad durante la toma de decisiones.

En términos de la variabilidad de la frecuencia cardíaca se presentan los resultados de los componentes de baja y alta frecuencia debido a que los registros son cortos. En los escenarios de confort no se encontraron diferencias significativas entre grupos en el componente de baja frecuencia (LF), sin embargo, en los escenarios de emergencia se presentó un LF significativamente mayor en el grupo 4 ( $39.75 \pm 9.5\%$ ,  $p=0.001$ ;  $2564.33 \pm 614.6 \mu s^2$ ,  $p=0.009$ ) comparado con el grupo 2 ( $28.9 \pm 12.6\%$ ;  $1159.85 \pm 494 \mu s^2$ ). Esto indica que con el aumento de la exposición a la operación de ART hay un mayor componente parasimpático, lo que se evidencia en el grupo 4 quienes tienen el mayor número de horas de vuelo.

Con el fin de controlar la influencia de variables ambientales sobre los resultados, se realizó un monitoreo de las mismas en las simulaciones (ver Tabla 5). Como resultado, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos 1, 2 y 3 en las diferentes variables ambientales durante la simulación ( $p > .05$ ), lo que indica que las condiciones de simulación son similares entre sí y por tanto se controla la influencia que estas pudieran tener sobre la medición de las variables fisiológicas en los diferentes grupos de estudio. No fue posible calcular esta diferencia en relación con el grupo 4 debido al tamaño de la muestra ( $N=2$ ).

Tabla 5. Registro de variables ambientales durante simulaciones

Grupo horas vuelo	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Nivel de Sonido (Dd)	Nivel de luz ambiental (Lux)
1	26±2	68±1	50.2±7.46	87.6±24.8
2	25±2	66±5	47.67±4.5	89.5±24.84
3	23±0	80±0	51.81±8.64	93.99±24.24
4	29±0	70±1	45.5±0.53	62.5±0.52

Nota: Resultados presentados como media ± desviación estándar.

Fuente: autores

## Actividad cerebral

Con el fin de poder realizar el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos del monitoreo cerebral, se realizó una asignación numérica a cada uno de los colores del espectro (ver Tabla 6, Figura 1) generando una variable categórica ordinal para registrar el resultado por electrodo. Los resultados de la actividad cerebral de los participantes durante las simulaciones en escenarios de confort y de emergencia se presentan en las tablas 7, 8 y 9. Los análisis se hicieron para las bandas Alfa, beta y gama teniendo en cuenta el número de horas de vuelo de los participantes en equipos ART Scan-Eagle.

Tabla 6. Asignación numérica por cada uno de los colores derivados del análisis de poder espectral en EEGLAB

Color Espectro	Código	Nivel de Actividad
Rojo	1	Máxima
Naranja	2	Alta
Amarillo	3	Alta Intermedia
Azul claro	4	Intermedia
Aguamarina	5	Intermedia Baja
Azul medio	6	Baja
Azul Oscuro	7	Muy baja

Fuente: autores

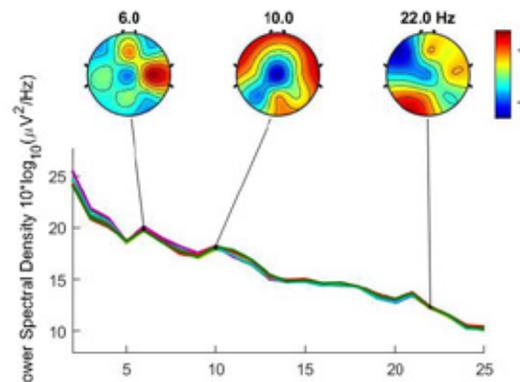


Figura 1. Ejemplo de resultados de poder espectral obtenidos en EEGLAB

Fuente: autores

**Tabla 7. Actividad cerebral banda Alfa (10 Hz)**

Horas en equipo	Escenario	F3 10 HZ	FZ 10H	F4 10HZ	C3 10HZ	CZ 10HZ	C4 10HZ	P3 10HZ	PZ 10HZ	P4 10HZ
1	Confort	2, 6 (30%)	1 (40%)	1,7 (30%)	4,5 (30%)	4 (30%)	3 (40%)	3 (40%)	4 (40%)	1 (40%)
	Emergencia	3,6,7 (20%)	1 (33,3%)	5 (26,7%)	5 (33,3%)	6 (26,7%)	4 (33,3%)	1 (33,3%)	4 (60%)	7 (40%)
2	Confort	7 (31,3%)	4 (37,5%)	4 (31,3%)	3 (43,8%)	5 (50%)	4 (37,5%)	1 (56,3%)	4 (56,3%)	7 (56,3%)
	Emergencia	5 (20,8%)	3,4 (29,2%)	3 (29,2%)	5 (25%)	5 (54,2%)	4 (37,5%)	1 (58,3%)	4 (29,2%)	7 (54,2%)
3	Confort	1 (50%)	1,3 (50%)	2 (75%)	3 (50%)	4,5 (50%)	4 (50%)	4 (50%)	2 (50%)	1 (50%)
	Emergencia	1,4 (33,3%)	1 (33,3%)	3,4 (33,3%)	2,7 (33,3%)	4 (50%)	1 (66,7%)	1 (66,7%)	2,6 (50%)	2,4 (33,3%)
4	Confort	5 (50%)	2 (75%)	6 (50%)	3,6 (50%)	2,4,6,7 (25%)	2 (50%)	1,2,4,7 (25%)	6 (50%)	3,4,6,7 (25%)
	Emergencia	6 (50%)	1,5 (33,3%)	4 (50%)	3 (33,3%)	4,5 (33,3%)	2 (50%)	1,4 (33,3%)	5 (50%)	4 (33,3%)

Nota: Resultados obtenidos en la banda Alfa en escenarios de confort y emergencia según horas de vuelo en Scan-Eagle. En rojo se resaltan los electrodos que registraron mayor activación entre el rango 1-3. En el caso de varios niveles registrados con igual porcentaje, se muestran los niveles con el porcentaje individual.

Fuente: autores

**Tabla 8. Actividad cerebral banda Beta (20 Hz)**

Horas en equipo	Escenario	F3 22 HZ	FZ 22H	F4 22HZ	C3 22HZ	CZ 22HZ	C4 22HZ	P3 22HZ	PZ 22HZ	P4 22HZ
1	Confort	7 (40%)	4,7 (30%)	4,7 (30%)	5 (40%)	5 (50%)	3 (50%)	1,4 (30%)	3,4 (30%)	3,4 (30%)
	Emergencia	7 (33,3%)	7 (46,7%)	5 (40%)	4,5,6 (20%)	5 (26,7%)	3(40%)	1 (46,7%)	4 (46,7%)	3 (40%)
2	Confort	7 (37,5%)	2,4 (25%)	1,3,4,7 (18,8%)	3 (37,5%)	5 (50%)	3 (31,3%)	1 (43,8%)	4 (37,5%)	3 (31,3%)
	Emergencia	1 (33,3%)	3,7 (25%)	4 (29,2%)	4 (29,2%)	5 (37,5%)	4 (41,7%)	1 (25%)	3 (29,2%)	4 (25%)
3	Confort	1,3,5,6 (25%)	3,4,6,7 (25%)	4 (50%)	3 (75%)	4 (50%)	4 (50%)	1 (50%)	4 (50%)	2,3,5,7 (25%)
	Emergencia	4 (50%)	5 (83,3%)	5(83,3%)	3 (50%)	4 (66,6%)	5 (50%)	1 (66,7%)	1,3 (33,3%)	4 (50%)
4	Confort	1 (50%)	4 (50%)	4 (50%)	3,4,6,7 (25%)	5 (50%)	4 (50%)	1,3,5,6 (25%)	5 (50%)	3 (50%)
	Emergencia	6 (33,3%)	4,6,7 (33,3%)	6,7(33,3%)	3 (50%)	4 (50%)	1,4 (33,3%)	4 (50%)	4,5 (33,3%)	4 (33,7%)

Nota: Resultados obtenidos en la banda Beta en escenarios de confort y emergencia según horas de vuelo en Scan-Eagle. En rojo se resaltan los electrodos que registraron mayor activación en las escalas de 1-3. En el caso de varios niveles registrados con igual porcentaje, se muestran los niveles con el porcentaje individual.

Fuente: autores

**Tabla 9. Actividad cerebral banda Gama (40 Hz)**

Horas en equipo	Emergencias	F3 40 HZ	FZ 40H	F4 40HZ	C3 40HZ	CZ 40HZ	C4 40HZ	P3 40HZ	PZ 40HZ	P4 40HZ
1	0	1,5 (30%)	7 (50%)	5 (50%)	3 (30%)	4 (40%)	3 (30%)	1 (30%)	3,5 (30%)	3,4 (30%)
	1	6 (26,7%)	6,7 (40%)	6 (66,7%)	3 (40%)	2,4 (33,3%)	3,4 (33,3%)	1 (40%)	2 (33,3%)	4 (40%)
2	0	4 (25%)	4 (25%)	4 (50%)	3 (31,3%)	4 (56,3%)	3,4 (25%)	1 (37,5%)	2 (43,8%)	1,5 (25%)
	1	1,5 (20,8%)	4 (41,7%)	5 (54,2%)	3 (41,7%)	4,5 (25%)	4 (45,8%)	1 (37,5%)	1,6 (25%)	3 (33,3%)
3	0	3,4,6,7 (25%)	7 (50%)	6 (50%)	2 (50%)	4 (50%)	5 (50%)	2 (50%)	4 (50%)	1,5,6,7 (25%)
	1	2,3 (33,3%)	4,5,6 (33,3%)	5,6 (50%)	1 (66,7%)	4 (100%)	5 (66,7%)	1 (66,7%)	1,2,3 (33,3%)	2,4 (33,3%)
4	0	1 (75%)	2 (50%)	5 (50%)	3 (50%)	5 (50%)	1,4,5,6 (25%)	5 (50%)	3 (50%)	2,4 (50%)
	1	1 (50%)	6 (66,7%)	6 (66,7%)	2,4 (33,3%)	3 (50%)	1 (66,7%)	5 (33,3%)	5 (66,7%)	2 (50%)

Nota: Resultados obtenidos en la banda Gama en escenarios de confort y emergencia según horas de vuelo en Scan-Eagle. En rojo se resaltan los electrodos que registraron mayor activación en las escalas de 1-3. En el caso de varios niveles registrados con igual porcentaje, se muestran los niveles con el porcentaje individual.

**Fuente: autores**

Al analizar las zonas de activación cerebral por tipo de onda, se observa que el mayor número de zonas activas en la frecuencia gama se presentan en el grupo con menos horas de vuelo en las áreas parieto-occipital, tanto en escenarios de confort como de emergencia; el mayor número de zonas con actividad beta se presenta en el grupo 2 en ambos escenarios a nivel fronto-occipital. Las ondas Alfa se registraron en un mayor número de

zonas (fronto-parieto-occipital) en el grupo 3 en ambos escenarios.

### Funcionamiento neuropsicológico

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos por los participantes en las pruebas IGTv2 y BANFE-2.

**Tabla 10. Resultados obtenidos en las pruebas IGTv2 y BANFE-2 agrupados según horas de vuelo**

		Grupos			
		1	2	3	4
Iowa Gambling Task	% (Percepción de contingencias de refuerzo y castigo) ▲	52.2 ±25	41±32	27±21	37±41
	T score	50.6±7	46.75±10	43±7	45±13
BANFE-2 Batería de funciones ejecutivas	Area Orbitomedial	88.6 ±26	91.875±23	88±27	98±8
	Área pre-frontal Anterior	98.4 ±14	94.25±13	95.5±8	100.5±15
	Área Dorsolateral (MT+FE)	95.4±12	103±10	92±14	86±10
	Puntaje total BANFE	93.4±15	99.25±11	90±4	90±7

\* diferencia estadísticamente significativa  $p \leq 0.05$ . ▲ IGT valor de referencia (40-60%)

**Fuente: autores**

El porcentaje de percepción de contingencias de refuerzo y castigo en el IGTv2 mostró que la puntuación obtenida por los grupos 1 y 2 se encuentra dentro de los valores de referencia (40-60%), en tanto que los grupos 3 y 4 tuvieron un desempeño por debajo del esperado (<40%), si bien, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre grupos. En la BANFE-2, no se obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento entre los grupos, sin embargo, se observa que el mayor desempeño en el área orbitomedial y prefrontal anterior fue para el grupo 4; y para el área dorsolateral para el grupo 2 (ver Tabla 9).

### Correlación entre variables fisiológicas y neuropsicológicas

Se realizó un modelo de regresión lineal múltiple con el fin de identificar las variables que explican mejor el desempeño de los participantes en términos de tiempo de ejecución de las tareas de simulación. La variable dependiente del modelo fue el tiempo de duración del escenario, y las variables independientes fueron la frecuencia cardiaca, la actividad electrodérmica, los componentes de la

variabilidad de la frecuencia cardiaca (HF%, HF un, HF us2, LF%, LF un, LF us2 y LF/HF), los componentes de la prueba BANFE-2 (área orbitomedial, dorsolateral y prefrontal anterior) y el porcentaje de percepción de contingencias de refuerzo y castigo de la IGTv2.

Al correr el análisis se obtuvieron 2 modelos. El primer modelo indica que la variable predictora del tiempo de ejecución de un escenario es el valor del % de percepción de contingencias del IGTv2, con un coeficiente de correlación múltiple  $R=0.391$ , un  $R^2$  corregido del 0.187 y una significancia  $p=0.001$ . El segundo modelo indica que las variables predictoras del tiempo de ejecución de un escenario son el % de percepción de contingencias del IGTv2 y la actividad electrodérmica con un coeficiente de correlación  $R=0.461$  y un  $R^2$  corregido de 0.187, con una significancia  $p=0.001$ .

En la tabla 11, se muestran los predictores del desempeño de operadores de ART Scan–Eagle, teniendo como variable dependiente la duración de las simulaciones expresadas en minutos.

Tabla 11. Predictores del desempeño de operadores de ART Scan–Eagle

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95.0% para B		
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	
1	(Constante)	4.815	3.504			-2.188	11.817	
	Igt percepción contingencias	.217	.064	.391	3.372	.001	.088	.345
2	(Constante)	11.312	4.538			2.240	20.383	
	Igt percepción contingencias	.247	.064	.446	3.861	.000	.119	.375
	EDA	-.745	.344	-.250	-2.166	.034	-1.432	-.058

Fuente: autores

## Discusión

El propósito de este estudio ha sido describir y correlacionar las respuestas fisiológicas y neuropsicológicas durante la toma de decisiones en situaciones de confort y emergencia de operadores de ART Scan–Eagle de la FAC, esto, con el fin de identificar factores inherentes a cada individuo que pueden ser determinantes en la toma de decisiones durante la operación.

Con relación a las respuestas fisiológicas, es posible observar que en el grupo de instructores (grupo 4) con mayor número de horas de vuelo, hay un aumento significativo en la actividad electrodérmica y en el componente LF de la variabilidad de la frecuencia cardiaca, lo cual se explica por una mayor actividad del sistema nervioso simpático en situaciones operacionales en las cuales deben elevar la alerta situacional; este tipo de respuesta es característica en condiciones de estrés (Mojica-Londoño, 2017; Steenbergen, Colzato & Maraver, 2020).

Es interesante observar que el aumento de la actividad simpática en el grupo 4 ocurre principalmente en la actividad electrodérmica y en menor medida en la frecuencia cardiaca, a diferencia de lo observado en el grupo 1, el cual tiene menos horas de vuelo. En este grupo se observó que su componente simpático aumenta principalmente en relación a la actividad cardiaca, traduciéndose en una taquicardia propia de la curva de aprendizaje en la actividad realizada y el grado de emocionalidad que representa la tarea (Hoogendoorn et al., 2009; Mojica-Londoño, 2017).

Estos hallazgos pueden ser explicados por procesos principalmente de origen mental para el grupo de instructores, los cuales recurren a su amplio conocimiento y experiencia. Esto se traduce en un mejor balance simpático y parasimpático de su sistema (Colzato, Jongkees,

de Wit, van der Molen & Steenbergen, 2018; Merchán-Clavellino, Salguero-Alcañiz, Barbosa & Alameda-Bailén, 2019).

La curva de aprendizaje se puede observar también en los resultados del presente estudio en relación a la actividad cerebral. El grupo 1 presentó un patrón de actividad cerebral caracterizado por ondas gama en zonas cerebrales relacionadas con la motricidad, el razonamiento matemático y la integración sensorial requerida para una orientación visoespacial; habilidades adquiridas previamente mediante entrenamiento y que son requeridas para la tarea específica de control de los ART (Lutzenberger et al., 2002). El grupo 2 presentó un mayor número de áreas cerebrales con actividad beta, principalmente a nivel fronto-occipital, lo que indica una mayor carga cognitiva y sugiere una mayor integración de información requerida para la toma de decisiones, así como una mayor actividad para la orientación espacial (Jokisch & Jensen, 2007). Esta progresión nos lleva al grupo 3, el cual registró el mayor número de zonas cerebrales con actividad Alfa. La actividad Alfa se relaciona con una inhibición funcional a nivel fronto-parieto-occipital que supone una mayor selectividad de la información proveniente del entorno, lo que permite una mayor atención sobre la tarea; y se asocia a una actividad de eventos que requieren cálculos, procesamiento de información, y de los conocimientos previos de operación del equipo (Chen et al., 2010). Finalmente, el grupo 4 tuvo el menor número de zonas cerebrales activas con ondas Alfa, beta y gama, deja ver como la experiencia favorece el aprendizaje llevando a una toma de decisiones más rápida e intuitiva. En este grupo la actividad Alfa se centró a nivel frontoparietal, la beta a nivel parietal y la gama a nivel fronto-parieto-occipital (Lázaro & Ostrosky-Solís, 2012).

Así, en cuanto a los resultados derivados de la actividad cerebral, se identifica que las áreas

del cerebro con mayor participación en la operación de equipos Scan–Eagle son aquellas relacionadas con procesos de razonamiento numérico, orientación espacial, y un alto componente de interpretación visual; así mismo, existe una activación frontal importante, lo que indica que las funciones ejecutivas, entre estas, la toma de decisiones, son habilidades relevantes en la operación. Adicionalmente, se puede observar como la integración sensorial y motora entre los diferentes estímulos visuales y la operación del joystick del equipo representa una gran carga de la actividad cerebral de los operadores, especialmente de aquellos del grupo 1, los cuales están adquiriendo habilidades progresivamente.

En relación con el funcionamiento neuropsicológico, se destaca que entre más horas de vuelo en el equipo ART Scan–Eagle los operadores tienen un tipo de pensamiento más relacionado con áreas frontomediales del cerebro, es decir, un pensamiento más automático y menos reflexivo; a diferencia de lo observado en operadores con menor número de horas de vuelo cuyo pensamiento es más reflexivo y en términos de tiempo más lento (Lázaro & Ostrosky-Solís, 2012). Este hallazgo coincide con el hecho de que en el EEG los operadores más experimentados presentan el menor número de áreas cerebrales activadas en cada una de las frecuencias (alfa, beta y gama), esto implica un mayor grado de aprendizaje y consolidación de las habilidades requeridas para la operación. Estos hallazgos permiten observar una correspondencia entre los resultados de la BANFE-2, IGTv2 y las imágenes derivadas por EEGLAB de los monitoreos cerebrales, resultados que se han obtenido en estudios previos con el uso de Tomografía de emisión de positrones y resonancia magnética cerebral funcional (Aram et al., 2019).

Los resultados conjuntos entre las variables fisiológicas estudiadas (variabilidad de la frecuencia cardíaca y actividad electrodérmica), así como los resultados del monitoreo cerebral y los

resultados de las pruebas BANFE-2 e IGTv2, dejan en evidencia que hay una correspondencia entre la actividad cerebral, el T Score de la BANFE 2, la hipótesis del marcador somático y la toma de decisiones. Estos resultados presentan congruencia con lo sugerido por Poppa y Bechara (2018), para quienes la corteza prefrontal ventromedial provee el medio propicio para el aprendizaje a través de una asociación entre situaciones complejas y un estado bio-regulatorio asociado con la experiencia previa del individuo. Este aprendizaje puede ser reactivado a través de un evento con características similares produciendo un bucle corporal o “Body-loop” en el cual el cuerpo cambia en respuesta a la actividad cerebral a través de la corteza somatosensorial e insular generando con el tiempo un patrón neural. La vía de este patrón es mediante la señalización aferente del nervio vago estimulando los sistemas de aprendizaje, memoria, motivación y valoración. Los autores finalmente sugieren que el efecto “body-loop” muestra la relevancia de los marcadores somáticos como herramientas de predicción de refuerzos o un comportamiento dirigido a objetivos específicos.

A partir de la regresión lineal múltiple se identificó la actividad electrodérmica como el mejor marcador somático de la transición de aprendizaje en la operación de ART Scan–Eagle. Ésta tiene una correlación directa con el tiempo de ejecución de los escenarios, lo que se traduce en toma de decisiones acertadas y rápidas para la ejecución de la tarea, sugiriendo que se necesita un pensamiento automático efectivo para la operación de Scan–Eagle. Estos hallazgos coinciden con la hipótesis del marcador somático, ya que la toma de decisiones estaría asociada a factores motivacionales y emocionales que tienen lugar en niveles de procesamiento pre-racionales (Poppa & Bechara, 2018; Christopoulos, Uy & Yap, 2019).

De igual manera, se observó que el grupo con mayor número de horas de vuelo es el que menor

percepción de riesgo tiene en la prueba IGTv2, lo cual podría explicarse como un exceso de confianza ante la tarea. En este sentido, contar con un sistema de alerta temprana derivado de marcador somático es de gran valor para reducir el error humano por sobreconfianza.

La relación entre cognición y sistema autónomo ha sido descrita en un estudio previo utilizando la tomografía por emisión de positrones (TEP) y mediciones de la actividad electrodérmica. En ese trabajo se observó la activación de la corteza cingulada anterior como anticipación a la toma de decisiones en condiciones de riesgo, lo que se reflejaba sobre la actividad electrodérmica (Critchley, Mathias & Dolan 2001; Christopoulos et al., 2019).

Por todo lo anterior, es posible observar que se requieren estrategias para desarrollar en operadores con menos horas de vuelo características de instructores, tales como un pensamiento automático y una mayor actividad cerebral Alfa y gama, las cuales son indicadoras de acciones inconscientes y consolidación de conocimiento respectivamente. Así mismo, es importante el desarrollo de una mayor percepción de riesgo en el personal más experimentado, ya que la curva de aprendizaje en cualquier escenario hace que la persona entre más conozca y genere automatismo tienda a reducir la percepción de riesgo sobre la tarea, situación que no debe suceder en la operación de Scan–Eagle debido a su naturaleza operacional aeronáutica, en la cual un error puede generar consecuencias indeseables.

## Conclusiones

De la presente investigación es posible concluir que las características de la toma de decisiones de los operadores de ART Scan–Eagle de la FAC varían según la experiencia que tienen en la operación del equipo, estimada en función del número de horas de vuelo.

Se identificó como punto de corte para la diferenciación en los cambios de los procesos neuropsicológicos y respuestas fisiológicas, las 500 horas de operación en el equipo de Scan–Eagle. En los operadores con menos de 500 horas de operación, se observa un pensamiento más reflexivo y una respuesta fisiológica más autónoma derivada del instinto de riesgo y supervivencia debido a una menor experticia. Esto también se asocia a un proceso progresivo de consolidación de habilidades para la operación y la toma de decisiones reflejadas en un mayor número de áreas de activación cerebral beta y gama las cuales evidencian procesos que requieren mayor aprendizaje, carga cognitiva y consolidación progresiva del conocimiento.

En contraste, los operadores con más de 500 horas de operación en el equipo tienen un pensamiento más automático, lo que genera menor respuesta fisiológica a nivel cardiovascular y respuestas más intuitivas reflejadas a nivel de la actividad electrodérmica. Adicionalmente, este grupo presenta un menor número de áreas cerebrales con alta actividad beta, lo que deja en evidencia una consolidación de procesos intuitivos y una mayor consolidación del conocimiento que favorece la toma de decisiones ante una menor carga cognitiva en la operación y permite ver como la EDA puede ser de utilidad como marcador somático para asistir a la toma de decisiones en situaciones de emergencia a través de sistemas de alerta temprana fisiológicos.

El porcentaje de percepción de riesgo y recompensa derivado del IGTv2 en conjunto con la actividad electrodérmica, son factores que podrían predecir el tiempo de ejecución de tareas lo que para la presente investigación indica un menor tiempo en los escenarios con una toma de decisiones más efectiva. Estos hallazgos son la base para el desarrollo de futuras investigaciones para determinar estrategias de entrenamiento, evaluación y seguimiento, con el fin de que los operadores desde sus primeras horas de

vuelo tengan la proeficiencia de operadores expertos con un pensamiento intuitivo y con una mayor percepción del riesgo.

Finalmente, se concluye que la herramienta EEGLAB puede ser de utilidad para el análisis de monitoreo cerebral en este tipo de estudios, y para la realización de análisis de correspondencia con pruebas neuropsicológica cuando no se cuenta con equipos para tomografía de emisión de positrones y resonancia magnética funcional u otro tipo de imágenes diagnósticas.

## Limitaciones y recomendaciones

Una de las limitaciones del presente trabajo es el tamaño de la muestra, por lo que se planea una futura investigación donde se involucre un mayor número de participantes por grupos con el fin de replicar la metodología aquí realizada y validar los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos se convierten en el punto de partida de una línea de investigación que busca aplicar el marcador somático en el desarrollo de sistemas complementarios de detección temprana del riesgo y en sistemas de evaluación de entrenamiento.

## Agradecimientos

El presente proyecto se realizó gracias al apoyo del personal de instructores y alumnos de la Escuela Básica de Aeronaves Remotamente Tripuladas EBART de la Fuerza Aérea Colombiana, y al personal de asistentes de investigación del Centro de Investigaciones Biomédicas Aeronáuticas y Espaciales y la Dirección de Medicina Aeroespacial; finalmente, al apoyo de la Fuerza Aérea Colombiana, del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) y de la Jefatura de Educación Aeronáutica FAC.

## Referencias

- Aram, S., Levy, L., Patel, J. B., Anderson, A. A., Zaragoza, R., Dashtestani, H., ...& Tracy, J. K. (2019). The Iowa Gambling Task: A Review of the Historical Evolution, Scientific Basis, and Use in Functional Neuroimaging. *SAGE Open*, 9(3),1-12. <https://doi.org/10.1177/2158244019856911>
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295–307. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.3.295>
- Chen, Z., Meichsner, J. H., Zou, S., & Zhao, L. (2010). Correlation between alpha rhythm and cognitive processes. *3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 2, 823–827. <https://doi.org/10.1109/BMEI.2010.5639933>
- Christopoulos, G. I., Uy, M. A., & Yap, W. J. (2019). The Body and the Brain: Measuring Skin Conductance Responses to Understand the Emotional Experience. *Organizational Research Methods*, 22(1), 394–420. <https://doi.org/10.1177/1094428116681073>
- Colzato, L. S., Jongkees, B. J., de Wit, M., van der Molen, M. J. W., & Steenbergen, L. (2018). Variable heart rate and a flexible mind: Higher resting-state heart rate variability predicts better task-switching. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18(4), 730–738. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0600-x>
- Contreras, D., Catena, A., Cándido, A., Perales, J. C., & Maldonado, A. (2008). Funciones de la corteza prefrontal ventromedial en la toma de decisiones emocionales. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 8(1), 285–313. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33780119>
- Critchley, H. D., Mathias, C. J., & Dolan, R. J. (2001). Neural Activity in the Human Brain Relating to Uncertainty and Arousal during Anticipation. *Neuron*, 29(2), 537–545. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00225-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00225-2)
- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain*. New York: Avon Books.
- Hoogendoorn, M., Merk, R.J., Roessingh, J. J., & Treur, J. (2009). Modelling a Fighter Pilot's Intuition in Decision Making on the Basis of Damasio's Somatic Marker Hypothesis. <https://www.semanticscholar.org/paper/Modelling-a-Fighter-Pilot-%E2%80%99-s-Intuition-in-Decision-Hoogendoorn-Merk/6886bc3f04906c9edc69711bc2ea331f841a0126>
- Jokisch, D., & Jensen, O. (2007). Modulation of Gama and Alpha Activity during a Working Memory Task Engaging the Dorsal or Ventral Stream. *Journal of Neuroscience*, 27(12), 3244–3251. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5399-06.2007>

- Kelly, D., & Efthymiou, M. (2019). An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. *Journal of Safety Research*, 69, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.03.009>
- Flores, L., & Ostrosky, S. (2012). *Desarrollo neuropsicológico de lóbulos frontales y funciones ejecutivas*. Editorial Manual Moderno.
- Lázaro, J. C. F., Solís, F. O., & Lozano, A. (2008). Batería de Funciones Frontales y Ejecutivas: Presentación. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 8(1), 141–158.
- López, D., & Malpica, D. (2013). Análisis y clasificación de factores humanos en eventos no deseados de seguridad operacional (evesos) de aeronave remotamente tripuladas (ART) de la Fuerza Aérea Colombiana en el 2012 (Informe de Investigación Programa Especialización en Gestión de la Seguridad Aérea). Bogotá, Escuela de Postgrados Fuerza Aérea.
- Lutzenberger, W., Ripper, B., Busse, L., Birbaumer, N., & Kaiser, J. (2002). Dynamics of Gamma-Band Activity during an Audiospatial Working Memory Task in Humans. *The Journal of Neuroscience*, 22(13), 5630–5638. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.22-13-05630.2002>
- Márquez, M. del R., Salguero, P., Paino, S., & Alameda, J. R. (2013). La hipótesis del Marcador Somático y su nivel de incidencia en el proceso de toma de decisiones. *Revista electrónica de Metodología Aplicada*, 18(1), 17-36. [https://www.researchgate.net/publication/259443123\\_La\\_hipotesis\\_del\\_Marcador\\_Somatico\\_y\\_su\\_nivel\\_de\\_incidencia\\_en\\_el\\_proceso\\_de\\_toma\\_de\\_decisiones](https://www.researchgate.net/publication/259443123_La_hipotesis_del_Marcador_Somatico_y_su_nivel_de_incidencia_en_el_proceso_de_toma_de_decisiones)
- Martínez-García, C., Merchán-Clavellino, A., Sánchez, L. M., & Gómez-Molinero, R. (2019). Proceso emocional de la toma de decisiones en estudiantes universitarios. *Revista INFAD de Psicología International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 5(1), 261-272. <https://doi.org/10.17060/ijodaep.2019.n1.v5.1595>
- Merchán-Clavellino, A., Salguero-Alcañiz, M. P., Barbosa, F., & Alameda-Bailén, J. R. (2019). Decision Making Profile of Positive and Negative Anticipatory Skin Conductance Responders in an Unlimited-Time Version of the IGT. *Frontiers in Psychology*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02237>
- Mojica-Londoño, A. G. (2017). Actividad electrodérmica aplicada a la psicología: Análisis bibliométrico. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 18(4), 46–56. <http://previous.revismexneurociencia.com/articulo/actividad-electrodermica-aplicada-la-psicologia-analisis-bibliometrico/>
- Morandín-Ahuerma, F. (2019). La hipótesis del marcador somático y la neurobiología de las decisiones. *Escritos de Psicología*, 12(1), 20–29. <https://doi.org/10.5231/psy.writ.2019.1909>

- Murray, C. C., & Park, W. (2013). Incorporating Human Factor Considerations in Unmanned Aerial Vehicle Routing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 43(4), 860-874. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2216871>
- Poppa, T., & Bechara, A. (2018). The somatic marker hypothesis: Revisiting the role of the 'body-loop' in decision-making. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.10.007>
- Sandor, S., & Gürvit, H. (2019). Development of somatic markers guiding decision-making along adolescence. *International Journal of Psychophysiology*, 137, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.12.005>
- Steenbergen, L., Colzato, L. S., & Maraver, M. J. (2020). Vagal signaling and the somatic marker hypothesis: The effect of transcutaneous vagal nerve stimulation on delay discounting is modulated by positive mood. *International Journal of Psychophysiology*, 148, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.10.010>
- TenHouten, W. D. (2016). Embodied Feeling and Reason in Decision-Making: Assessing the Somatic-Marker Hypothesis. *Revista Latinoamericana de Estudios Sobre Cuerpos, Emociones y Sociedad*, 8(20), 87-97. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6983950>
- Thompson, W., Tvaryanas, C., & Constable, S. (2005). U.S. Military unmanned aerial vehicle mishaps: Assessment of the role of human factors using human factor analysis and classification system (HFACS). (Technical report No.HSW-PE-BR-TR-2005-0001). Dayton-OH: USAF 31th Performance Enhancement Directorate. <https://pdfs.semanticscholar.org/4edf/74cf214b4d9d59aa1945825e40e4ef22bf67.pdf>
- Tvaryanas, A. P. (2006). Human Systems Integration in Remotely Piloted Aircraft Operations. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(12), 1278-1282. <https://www.ingen-taconnect.com/content/asma/ asem/2006/00000077/00000012/art00011;jsessionid=310vrkjkce03.x-ic-live-03>

- Weigmann, D., & Shapell, S. (1997). Human factor analysis of postaccident data. *The International Journal of Aviation Psychology*, 7(1), 67-81. [https://doi.org/10.1207/s15327108i-jap0701\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327108i-jap0701_4)
- Weigmann, D., & Shapell, S. (2001). *A human error analysis of comercial aviation accidents using the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)*. Technical Report DOT/FAA/AM-01/3. Office of Aviation Medicine Federal Aviation Administration, Washington D.C United States of America. [https://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/oamtechreports/2000s/media/0103.pdf](https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2000s/media/0103.pdf)
- Wenjuan Z., Feltner, D., Shirley, J., Swangnetr, M., & Kaber, D. (2016). *Unmanned aerial vehicle control interface design and cognitive workload: A constrained review and research framework*. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844502>
- Wild, G., Gavin, K., Murray, J., Silva, J., & Baxter, G. (2017). A Post-Accident Analysis of Civil Remotely-Piloted Aircraft System Accidents and Incidents. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 9(2), 157-168. <https://doi.org/10.5028/jatm.v9i2.701>
- Wild, G., Murray, J., & Baxter, G. (2016). Exploring Civil Drone Accidents and Incidents to Help Prevent Potential Air Disasters. *Aerospace*, 3(3), 22. <https://doi.org/10.3390/aerospace3030022>