

DOCUMENTOS

A pilot in a green flight suit and helmet with oxygen mask, standing in front of a fighter jet on a tarmac. The pilot is wearing a green flight suit with various pockets and equipment. The helmet is black with a clear visor and an oxygen mask. The background shows a fighter jet on a tarmac under a blue sky with clouds.

**Medidas preventivas en el medio
aeroespacial para la salud de
los pilotos de aeronaves de
alta maniobrabilidad**

Medidas preventivas en el medio aeroespacial para la salud de los pilotos de aeronaves de alta maniobrabilidad

Luis Quevedo Aguado

Departamento de Proyectos Sanitarios. Ibermutuamur

Manuel Bernaola Alonso

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT

En aviación influyen multitud de variables cuyos valores son bastante diferentes a los del medio ambiente habitual tales como la presión barométrica, la temperatura, las fuerzas de aceleración y la orientación espacial. Conviene conocer cómo se comporta cada una de ellas para facilitar el diseño correcto de las naves y cabinas de los tripulantes y los procedimientos para desarrollar las tareas, y dotar al personal de los medios necesarios para evitar o controlar los riesgos potenciales.

1. Introducción

La invención de los motores de combustión interna a finales del siglo XIX hizo que el hombre fuera capaz de propulsar un artefacto volador. Los aviones han sufrido un desarrollo enorme hasta el día de hoy que contempla importantes avances tecnológicos. Su utilización permite una clasificación, que los divide en dos grupos: los aviones para uso civil y los aviones para uso militar.

La ingeniería aeronáutica investiga, diseña, manufactura y mantiene en buen estado los aviones, misiles y

satélites espaciales. La investigación actual en aeronáutica está principalmente controlada por corporaciones independientes y universidades, aunque también hay agencias gubernamentales como la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos (NASA) o la Agencia Espacial Europea (ESA).

La Medicina espacial es una rama de la medicina aeronáutica que surge de los primeros intentos de llevar a cabo un vuelo espacial en ausencia de atracción gravitacional terrestre y explorar

los astros. Los proyectos iniciales para llevar al espacio exterior a un ser humano, como Mercury (1961-1963), Gemini (1964-1966), en el que se ensayaron por primera vez los cambios de órbita de una nave tripulada, Apolo, programa que culminó con el alunizaje el 20 de julio de 1969 del Apolo 11, Skylab (1973-1979) y Soyuz (que comenzó su andadura en 1967), necesitaron resolver básicamente aspectos tales como:

- el aporte de una atmósfera adecuada para la respiración,

- el mantenimiento de una presión adecuada,
- el aprovisionamiento de agua y alimentos,
- la eliminación de residuos y sustancias catabólicas,
- el control térmico del vehículo,
- la superación técnica de condiciones extremas de temperatura, de la aceleración y de la ausencia de peso (gravedad 0).

En los vuelos espaciales en las fases de despegue, aterrizaje o durante el vuelo se dan condiciones gravitacionales muy diferentes a las terrestres. Se pasa de la ausencia de gravedad durante el vuelo orbital ($G=0$) a valores de 7G durante la aceleración y deceleración del vehículo. El astronauta tiene una sensación similar, pero a mucha mayor escala, que la experimentada de arrastre hacia abajo cuando arranca muy rápido un ascensor. Una aceleración de 7G hace que nuestro peso aumente siete veces, al igual que los tejidos y órganos internos, de ahí que se tenía una gran preocupación en torno a las condiciones y posibilidades de vida de los astronautas. Sin embargo, el cuerpo humano se ha mostrado mucho más resistente de lo previsto, siendo capaz de soportar aceleraciones incluso del orden de 20G durante un corto periodo de tiempo.

El primer vuelo espacial del hombre en órbita terrestre, con una duración de 108 minutos y en el que hubo que crear condiciones artificiales muy particulares, fue llevado a cabo por Yuri Gagarin el 12 de abril de 1961. Este vuelo marcará la consolidación de la medicina aeroespacial.



2. Medicina aeroespacial

La **Medicina aeroespacial** o **aeronáutica** es una especialidad que estudia las patologías y trastornos del organismo humano asociados con el vuelo. Con carácter preventivo, estudia el efecto de la exposición a las especiales condiciones del medio y el de diferentes fármacos, drogas o patologías en la práctica del vuelo o la tripulación de aeronaves.

Los vuelos espaciales de larga duración han constatado y puesto de manifiesto que los astronautas sufren diversos fenómenos fisiológicos y psicológicos durante sus viajes: desde pérdida de masa ósea (de hasta un 20% en misiones prolongadas) a alteraciones cardiovasculares y del sistema digestivo, problemas respiratorios, atrofas musculares o alteraciones del sueño.

Entre otras alteraciones y efectos más interesantes del vuelo cabe citar las siguientes: visión negra (black out),

visión roja (red out o eritropsia) y cinetosis

Visión negra

La **visión negra** o "*black out*" ocurre cuando el piloto eleva el avión bruscamente con un aumento de aceleración vertical (medida en "nº de G" o fuerzas G). Debido al principio de inercia, como resultado el fluido sanguíneo tiende a permanecer en reposo en lugar de seguir el movimiento vertical hacia arriba del cuerpo y, por tanto, con relación al cuerpo, se dirige a los pies, disminuyendo el riego sanguíneo del cerebro y produciendo como primer síntoma la aparición de un velo negro en la visión que da nombre al fenómeno y que puede derivar súbitamente en pérdida de conciencia con el peligro consiguiente para el vuelo.

El cuerpo humano debe someterse a aceleraciones entre cuatro y siete veces superiores a la de la gravedad para llegar a experimentar la visión negra, lo

cual puede ocurrir en aviones de grandes prestaciones al realizar maniobras bruscas, como durante la recuperación de un picado.

Para evitar los efectos de la visión negra se desarrolló el traje anti-G, consistente en unas cámaras hinchables que, al aumentar la aceleración vertical, se inflan oprimiendo el cuerpo del piloto en las piernas y el abdomen y evitan así que la sangre se desplace a esta parte del cuerpo y se pueda mantener el riego en el cerebro.

Eritropsia (visión roja)

La **eritropsia** o **visión roja** o "*red out*" es una alteración de la visión de carácter transitorio, en concreto de la percepción cromática, que consiste en la aparición de un tinte rojizo, el cual puede ser uniforme o no, que parece colorear todos los objetos y se puede manifestar, entre otras causas, cuando el individuo está expuesto a elevadas aceleraciones negativas, como ocurre en pilotos de aviones de altas capacidades, al realizar una brusca maniobra de picado aeronáutico.

La **visión roja** ocurre cuando el flujo de sangre en situaciones de Fuerza G negativa tiende a sobrecargar el cerebro y su periferia, ya que sus capilares se hinchan y/o estallan imprimiendo un fuerte velo rojo sobre la vista.

Cinetosis

La cinetosis es un trastorno neurológico que suele causar vómitos, náuseas, falta de equilibrio producido por la aceleración y desaceleración lineal y angular de forma repetitiva. La causa principal es una excesiva estimulación del aparato vestibular por el movimiento, siendo muy variable la susceptibilidad individual. Se puede potenciar

debido a estímulos visuales como un horizonte en movimiento, la mala ventilación debida a humos, monóxido de carbono o vapor, en muchas circunstancias asociados al vehículo de transporte y los factores emocionales, como el miedo o la ansiedad. Para reducir sus efectos, la mejor posición es la de decúbito supino o semirrecostado con la cabeza bien apoyada.

Otra de sus manifestaciones es el síndrome de adaptación espacial, que lo sufren los astronautas durante un viaje por el espacio a causa de la ausencia de gravedad. Al no tener sensación de peso, se altera la percepción de su sistema vestibular y el rendimiento durante los primeros días de vuelo espacial se ve reducido, pero normalmente la adaptación se logra a los pocos días. Se debe evitar el movimiento excesivo ya que empeora los síntomas.

3. Fisiología de la adaptación al espacio

Durante el vuelo espacial se produce un desplazamiento de los fluidos orgánicos en sentido cefálico debido a la ausencia de gravedad, causando una sobrecarga cardíaca y un incremento de la presión intravascular. Al mismo tiempo y por mecanismos complejos se reduce el volumen total de agua corporal, con la consiguiente hipovolemia. Se inicia cuando el astronauta adopta para el despegue la posición en decúbito, con piernas elevadas. Una vez ingresado el vehículo en órbita, la redistribución de líquidos concluye y se mantiene a lo largo de la estancia en el espacio. Se produce básicamente:

- alcalosis transitoria
- aumento de secreción de adrenalina y mineralocorticoides

- exacerbación de las respuestas simpáticas

Esta respuesta adaptativa permite explicar, en cierta medida, los efectos de la cinetosis espacial, la alteración de los patrones del sueño o la fatiga subaguda que aparece transcurridos seis meses de estancia en el espacio.

Los vuelos espaciales pueden causar variaciones hematológicas, inmunológicas y bioquímicas, modificaciones del sistema osteomuscular, alteraciones en las respuestas sensoriales (que suelen afectar a la visión, al equilibrio postural y al sueño a su vez influido fundamentalmente por la cinetosis, el ruido y la excitación) y repercusión en el sistema neurovestibular. En este último caso, la ausencia de gravedad puede influir de manera que genere los síntomas de cinetosis espacial. Afecta a entre un 40-50% de los tripulantes y la incidencia sería aún mayor sin la administración de medicación específica.

Hay ciertas diferencias con la cinetosis terrestre aunque la actividad fuera del vehículo espacial no genera nuevos síntomas. Al parecer, existe una predisposición individual e incluso, en cada individuo, acontecen modificaciones de la susceptibilidad durante su vida astronáutica.

Los síntomas aparecen después de producirse el ingreso en órbita y se agravan con los cambios de posición de la cabeza y con los movimientos del cuerpo. En general suelen desaparecer en el transcurso de dos a cuatro días. En ocasiones los síntomas se pueden mantener por algún tiempo en la fase de post vuelo, es el caso de los tripulantes del Skylab quienes tardaron una media de 10 días en recuperar la estabilidad postural.

4. Tipos de aceleración y sus características

Actualmente, existen aviones que vuelan a velocidades muy altas con una gran capacidad de maniobra y que dan lugar a exposiciones a fuerzas de aceleración tales que se superan, en ocasiones, los límites máximos de tolerancia, sometiendo al organismo a condiciones de estrés. Si se controlan, los efectos fisiológicos serán menores. La exposición a estas aceleraciones extremas pueden mermar el rendimiento de un piloto en un combate aéreo al alterar los sistemas: cardiovascular (corazón y vasos sanguíneos), respiratorio (pulmones) y vestibular (orientación).

Dependiendo del tipo de operación las aceleraciones pueden ser:

Lineales o longitudinales: si hay una variación de velocidad en la trayectoria rectilínea, positiva o negativa, como la producida en despegues y aterrizajes o al modificar la velocidad de vuelo.

Radial: sin cambiar la velocidad al cambiar la dirección, con la fuerza centrípeta dirigida hacia el interior de la órbita descrita.

Angular: cuando hay un cambio simultáneo de velocidad y dirección, como ocurre en maniobras de acrobacia aérea



(ochos lento y cubano, hoja de trébol y barreras) que afectan al sistema vestibular y de efectos conocidos como el "mal de aire".

En razón de su duración las aceleraciones pueden ser: **instantáneas** (≤ 1 segundo en el impacto de la nave en tierra), **intermedias** (entre 1 y 2,5 segundos en aeronaves en el despegue impulsadas por catapulta o aterrizaje detenidas con gancho en portaaviones) y **prolongadas** ($> 2,5$ segundos en aviación militar y acrobático).

Para que una nave en vuelo varíe su dirección se genera una fuerza centrípeta dirigida hacia el centro de la trayectoria seguida. En consecuencia, el piloto siente una fuerza centrífuga ficticia en sentido opuesto que le empuja contra su asiento. Así, cuando el avión cambia de

dirección, por ejemplo para ascender al salir de una picada, la fuerza centrípeta es la que provoca el ascenso del avión y la fuerza centrífuga presiona al piloto contra el asiento con una intensidad tal que es proporcional al cuadrado de la velocidad y a la masa de la nave e inversamente proporcional al radio de curvatura en la que se produce el cambio de dirección.

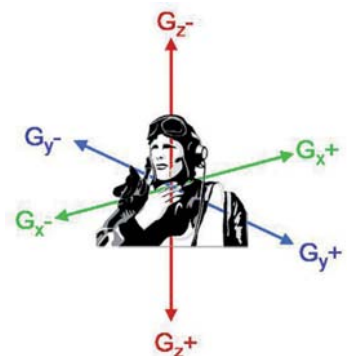
En la figura 1 se representa la codificación universal para designar las aceleraciones, según el eje del cuerpo sobre el que actúan y en la dirección en la que la fuerza centrífuga (aceleración) se genera. En la tabla 1 se citan maniobras en las que se dan este tipo de aceleraciones.

■ **Tabla 1** ■ Ejemplos de maniobras en las que se generan aceleraciones

Aceleración	Tipos de maniobras
(+Gz)	giros cerrados, maniobras de recuperación de picados y en las eyecciones
(-Gz)	looping externos y en picados
(+Gx)	aceleraciones sin cambio de dirección, en despegues catapultados desde portaaviones y en lanzamiento de naves aeroespaciales cuando los astronautas están de cúbito supino paralelos a la superficie terrestre
(-Gx)	deceleraciones lineales, aterrizajes asistidos en portaaviones y en la reentrada de naves aeroespaciales, excepto en lanzaderas espaciales que son (+ Gz)

Las aceleraciones laterales son de poca importancia

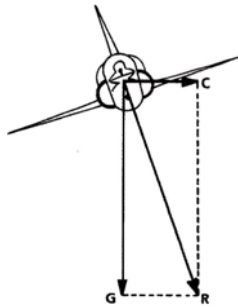
■ **Figura 1** ■



Tipos de aceleración y sus códigos

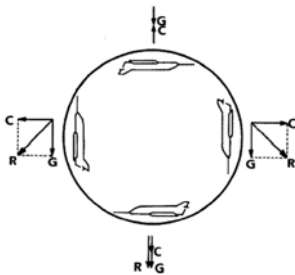
Cuando se describe un *looping* o circunferencia en el plano vertical como en las figuras 2 y 3, si se mantiene la velocidad constante que provoque una aceleración radial de 1G, al estar el avión en la parte inferior, la resultante será 2G y en la superior sería nula.

■ Figura 2 ■



Representación de la trayectoria y fuerzas en un *looping*

■ Figura 3 ■



Representación de la trayectoria y fuerzas en un *looping*

La pérdida de conciencia inducida por fuerza G (G-LOC por sus siglas en inglés) es el resultado de la exposición a fuerzas G excesivas y mantenidas que disminuyen el aporte sanguíneo al cerebro. De todas las fuerzas que sufre un piloto en su aeronave, solo pueden causar G-LOC las producidas en el **eje vertical**. Las

Las aceleraciones de +10Gz, sostenidas 15 segundos o más, requieren medidas activas y pasivas de protección

aceleraciones longitudinales y laterales no tienen efectos fisiológicos importantes.

Los pilotos generalmente se someten a (+Gz) y con menos frecuencia a (-Gz) aunque el avión por diseño impide aceleraciones superiores a -3,5Gz o -4Gz.

La pérdida de conciencia se puede producir en un giro cerrado que dure 15 segundos a una aceleración de +10Gz y se tolerará bien si apenas dura una fracción de segundo. Las aceleraciones sostenidas de 15 segundos o más requieren unas medidas activas y pasivas de protección.

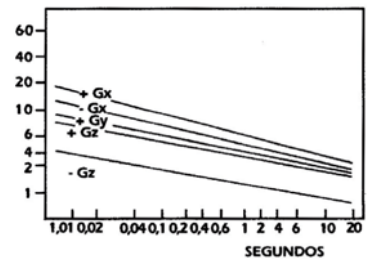
Los efectos de la aceleración dependen básicamente de estos parámetros:

- **Magnitud:** no es lo mismo una aceleración de +1,1G que otra de +11G ya, que mientras la primera apenas se siente, la segunda provocaría una pérdida de conocimiento.
- **Duración:** si es corta los efectos son menores y la tolerancia mayor. Al salir del avión con un asiento eyectable se alcanzan fuerzas de hasta +19G sin mayores problemas mientras que +5G mantenidos durante una maniobra pueden hacer perder el conocimiento.
- **Velocidad de establecimiento** (como la variación de la aceleración

en la unidad de tiempo): se toleran mejor los cambios progresivos que los bruscos.

En la figura 4 se representa la resistencia del hombre a las aceleraciones según dirección y duración.

■ Figura 4 ■



Tolerancia a las aceleraciones según dirección y duración.

En las figuras 5 y 6 se reflejan los efectos de las aceleraciones verticales.

A efectos prácticos, la aceleración ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) "multiplica" el peso. De este modo, la sensación producida en un piloto de 75 kg a 1G es como si su peso fuera de 300 kg a 4G. Uno de los efectos principales es la dificultad y lentitud de movimientos. La sangre tiende a bajar hacia las piernas, disminuyendo la presión en las partes más elevadas del organismo, como por ejemplo, en los ojos. Después de 3 segundos de estar sometido a una Gz+ de valor 3-4, la

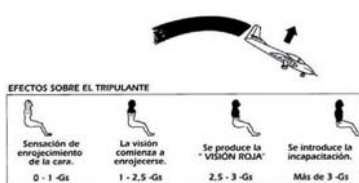
presión ocular hace que la retina reciba menos irrigación y empieza a funcionar incorrectamente, produciendo el efecto de "visión túnel". Tras 5 segundos a 4 Gz+ ó 5 Gz+ la visión tubular o central se hace gris, fase de "visión gris" o "grey out", y, si se aumenta la aceleración hasta unos 5G, se pierde de forma transitoria la visión (fase de "visión negra" o "black out"). No obstante, como las células de la retina tienen una reserva de oxígeno de unos cinco segundos, en ese tiempo no se produciría tal efecto, de ahí que sea importante la duración de la aceleración.

■ Figura 5 ■



Efectos de las aceleraciones verticales.

■ Figura 6 ■



Efectos de las aceleraciones verticales.

Del mismo modo, se disminuye el aporte de oxígeno al cerebro. Si se mantiene la situación de varias G durante un tiempo, el cerebro no recibirá sangre y se perderá la conciencia. Previamente, se dan los efectos visuales, pero, si la aceleración se establece rápidamente, pueden ocurrir al tiempo ambos efectos.

Además, las G positivas también pueden provocar el **desplazamiento de la piel** y pequeñas hemorragias (petequias).

¿Qué sucede mientras se produce un G-LOC?

Si se produce el G-LOC aunque la aceleración descienda a 1G, el piloto permanece inconsciente durante al menos 15 segundos y para despertar necesita 15-30 segundos más hasta la recuperación total con pérdida de memoria de lo ocurrido, lo que origina desorientación, ansiedad, temor y molestias propias de la altitud. La velocidad con que aumenta la aceleración en el tiempo es importante y si la tolerancia normal es de 1G cada segundo o dos segundos, aquella puede alcanzar hasta los 6Gz por segundo. Así, cuando la G aumenta rápidamente y se mantiene, el piloto pasará de la capacidad completa al estado de inconsciencia con síntomas de alteraciones de la vista.

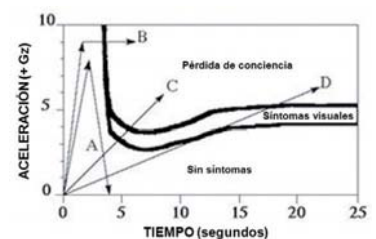
Básicamente el mecanismo del G-LOC no es difícil de entender ya que tanto el cerebro como los ojos necesitan oxígeno y azúcar (glucosa) suministrados por la sangre para su funcionamiento normal. Mientras que la glucosa se almacena en una pequeña cantidad, no ocurre lo mismo con el oxígeno. El sistema es capaz de compensar ciertos cambios si no se alcanzan Gz elevadas, con independencia de la carga que tenga que soportar el corazón. Si la aceleración aumenta mucho y se mantiene la situación durante un tiempo, el sistema falla y sobreviene el G-LOC.

5. Tolerancia a las fuerzas G

Los estudios de vuelo y centrífugos han identificado la tolerancia del hombre a fuerzas G con bastante exactitud. En la figura 7 se representan aceleraciones y tiempos así como las curvas de tolerancia

a fuerzas G para individuos en reposo y sin usar traje anti-G ni realizar maniobra alguna.

■ Figura 7 ■



Tolerancia a la aceleración +Gz.

El área superior derecha representa la zona donde ocurre el G-LOC (según +Gz y el tiempo transcurrido). La zona intermedia entre curvas es la región donde se dan las alteraciones de la visión sin que se produzca la pérdida de conocimiento. En la zona inferior no hay síntomas.

La línea "C" representa un aumento de la fuerza G lento (+0,5G/s) pero continuado de manera que a los 5 segundos se producen las alteraciones de la visión hacia los +3G y un poco después la pérdida de la conciencia a los +4G. La curva "D" representa un aumento de la G aún más lento con un nivel de alteración visual hacia los 15 segundos (+4G) y unos segundos después, cuando se alcanzan los +5G, la pérdida de conciencia. Si el aumento de la fuerza G es muy rápido y no se mantiene como en el caso de la línea "B", no se dará ninguno de los efectos estudiados. Este hecho permite que muchos pilotos no sufran efecto alguno a pesar de los fuertes aumentos de aceleración de muy corta duración.

Según los diferentes estudios las curvas y los valores pueden variar ligeramente pero de forma general, a partir +4,5Gz tiene lugar el G-LOC para in-

dividuos sin protección aunque pueda darse entre +2,5Gz y +6,5Gz.

La duración del periodo de G-LOC puede variar al restablecerse +1Gz, pero suele durar unos 15 segundos de inconsciencia seguido de otros quince de cierta incapacidad de reacción y llegar hasta los 3 minutos.

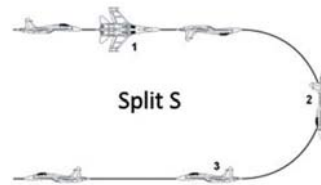
Dispositivos y maniobras para evitar un G-LOC

El organismo tiene **mecanismos propios de compensación** provocando un aumento de la frecuencia y la fuerza con la que se contrae el corazón. Sin embargo, esta adaptación tiene un retraso de hasta quince segundos, por lo que solo serviría para fuerzas de baja magnitud y larga duración.

Durante el despegue la fuerza de aceleración empuja en el respaldo del tripulante y cesa con un cambio en la velocidad. El tripulante ejerce una fuerza igual y opuesta hacia el respaldo. Cuando un avión vira en exceso o se recupera de un picado, está acelerando hacia arriba respecto del piloto (hacia arriba es hacia la cabeza), y la de reacción ejercida hacia el asiento es hacia los pies.

El sistema vascular del organismo hace que **la tolerancia a las G negativas sea menor** que a las positivas y poco se puede hacer al respecto. No obstante, los aviones, al igual que los humanos, tampoco toleran bien las fuerzas negativas ya que las alas están diseñadas para tirar "hacia arriba", no "hacia abajo" (con la excepción de los aviones acrobáticos). Por esa razón, una de las formas de evitar el exceso de G negativas es transformar las maniobras en otras con G positivas, como se hace en el Split S, según se ve en la figura 8.

■ **Figura 8** ■



Split S: Transformación de G negativas en positivas.

Respecto a las G positivas, que son las más comunes y problemáticas, el piloto debe tener una resistencia "natural". Así, un piloto de caza apto para el combate ha de ser **capaz de tolerar unas 5G durante cierto tiempo**.

La adopción de ciertas medidas permite aumentar la resistencia y eficacia del piloto. En primer lugar, la posición en la cabina (por ejemplo, posición recostada del asiento de unos 30° en el F-16), que alcanza su máxima expresión en las naves espaciales donde la tripulación va completamente tumbada, permitiendo fuerzas de hasta 26G.

Los **pantalones anti-G** con compartimentos que se inflan automáticamente con aire aumentando la tolerancia en unos 2,5G. Además, aún se puede conseguir **mayor tolerancia (2,5 G adicionales)** haciendo **maniobras de Valsalva** (espirando contra garganta cerrada) *asociada* a la contracción de la musculatura abdominal, e inspirando rápidamente tras cada intento (la maniobra debe comprender los tres pasos, dura unos cinco segundos y cansa, por lo que es difícil repetirla varias veces seguidas).

El piloto realiza una maniobra de protección anti-G hasta tolerar +7Gz o

+8Gz si se hace de forma correcta y entrenada, aunque produzca cansancio y fatiga, pero, si la maniobra se ejecuta mal, lleva a un deterioro en la tolerancia. Ha de ser previa al viraje propiamente dicho y persigue crear una condición de hipertensión arterial transitoria, mediante desplazamiento de la sangre de las extremidades inferiores aumentando el volumen sanguíneo torácico-abdominal, y facilitar su llegada al cerebro. Consta de cuatro pasos secuenciales:

- 1) Inhalación profunda llenando los pulmones.
- 2) Contracción secuencial de los músculos de los pies, pantorrillas, muslos, glúteos y abdominales, manteniéndola durante toda la maniobra.
- 3) Exhalación forzada contra una glotis cerrada que no deja escapar el aire.
- 4) Apertura de la glotis permitiendo la exhalación e inhalación corta y superficial cada 3 segundos.

6. Programas de entrenamiento para pilotos de aeronaves de alta maniobrabilidad

Los medios de protección frente a las aceleraciones positivas que se emplean en pilotos de aeronaves comprenden las maniobras de contracción muscular, los trajes anti-G, la respiración a presión positiva y el entrenamiento en centrífuga humana.

Este último punto se contempla en los Acuerdos de Normalización OTAN o STANAG (acrónimo de STANdardization AGreement) en su número 3827 ("Requerimientos mínimos para entrenamiento de las tripulaciones aéreas en ambiente de altas "G" sostenidas").

Dicho entrenamiento surge para poder tolerar mejor altas aceleraciones y disminuir sus posibles efectos, como la pérdida de conocimiento, y está dirigido fundamentalmente a pilotos militares con control electrocardiográfico (Foto 1). Los mínimos del STANAG determinan, entre otros, que se deben alcanzar 7G durante 15 segundos con incremento de al menos 1G/segundo.

El Ejército del Aire (Ministerio de Defensa, Gobierno de España) viene proporcionando entrenamiento específico en altas aceleraciones para pilotos de aeronaves de alta maniobrabilidad desde finales de la década de los 80, en las instalaciones del Instituto de Medicina Aeronáutica de la Real Fuerza Aérea Holandesa (próximo a la Base Aérea Soesterberg) mediante la exposición a tres perfiles diferentes de vuelo.



Foto 1: centrífuga humana.

El primer perfil sirve para valorar la tolerancia natural del piloto a aceleraciones sin medidas de protección (traje anti-G) y sin realizar maniobras de contractura muscular. Se alcanza un promedio +5Gz, con una aceleración de 1G/3 segundos, hasta que aparece afectación de la visión central.

El segundo perfil se efectúa con una mayor aceleración (1G/segundo) protegiendo al piloto con pantalones anti-G y



con maniobras de contractura muscular, manteniendo un nivel de +6Gz durante 30 segundos, logrando una buena perfusión vascular en la retina, sin síntomas visuales, controlando la fuerza de contracción muscular y la maniobra de respiración (expiración de aire con la glotis cerrada), con la menor fatiga posible.

En el tercer perfil, denominado de combate, se alcanzan niveles de aceleración de +7Gz y +8Gz durante cortos periodos de tiempo, de 10 a 15 segundos, con un mayor incremento de la aceleración del orden de 3G/segundo y uso desde el primer momento de medidas para mejorar la tolerancia a las aceleraciones (traje anti-G, maniobras de contracción muscular...).

Sin embargo, las características de aeronaves de cuarta generación como el *Eurofighter Typhoon* (de +9Gz a +12Gz; con un ritmo de aceleración de hasta 10-15G/seg) precisan un entrenamiento en altas aceleraciones más

exigente a través de centrífugas humanas que reproduzcan más fielmente dichas características. Esto ha obligado a algunos centros que prestaban estos servicios a adaptar sus anteriores sistemas de entrenamiento a los requerimientos actuales. Y eso es lo que ha hecho poner las miras hacia Alemania, concretamente a la localidad de Königsbrück, a 30 Km de Dresde.

La cuarta generación de aviones de combate introduce el uso de los trajes anti-G de plena cobertura FcAGT (*Full Coverage Anti G Trousers*) que protege mediante cámaras circunferenciales globales de 18 litros de capacidad la mitad inferior del cuerpo.

El National Space Biomedical Research Institute (NSBRI), en Estados Unidos, ha desarrollado una herramienta para asistir a los pilotos de naves espaciales y evitar que sufran desorientación espacial. El sistema incluye un software que vigila los movimientos de la nave y

las acciones del piloto, y sirve para avisarle en tiempo real para que realice cambio en la orientación. También se pretende incorporar una especie de chaleco salvavidas que vibrará cuando el piloto tenga que ajustar la orientación. Al parecer, se podrá emplear en los helicópteros y otras aeronaves, tanto militares como civiles.

7. Conclusiones

La presión barométrica disminuye a medida que la altitud aumenta y el oxígeno ejercerá una presión menor, con déficit de oxígeno celular y la hipoxia asociada. La temperatura disminuye a razón de 6,5° C cada 1000 metros de altura hasta altitudes superiores a 11000 metros que se considera constante.

Los pilotos de combate y acrobacia se someten a fuerzas de aceleración elevadas durante las maniobras. Las más peligrosas son las del eje Z(+) que llevan la sangre hacia los pies. La sangre oxigenada no retorna al cerebro y puede producir a una pérdida de conciencia. Además, el piloto puede presentar incapacidad para apreciar correctamente su posición y su

movimiento relativo al centro de la tierra, produciendo *desorientación espacial*

En la desorientación espacial intervienen varios factores que se suelen dar en situaciones de baja visibilidad (los humanos no son buenos para orientarse en vuelo, al no ser su medio habitual). La situación empeora aún más en una nave espacial ya que el piloto se mueve de lado a lado o rota en cualquier dirección.

Por otra parte, se consideran como factores determinantes de las aceleraciones: la intensidad, la velocidad de comienzo, la dirección y su duración. La fisiopatología refiere los factores hidrostáticos, hemodinámicos y de regulación refleja del aparato cardiocirculatorio. La exposición a +Gz produce reacciones adaptativas fisiológicas que, cuando se superan, propician la aparición de patologías de tipo cardiocirculatorio, respiratorio, músculo-esquelético, nervioso, sensorial, etc. Existen procedimientos y equipos específicos que protegen al piloto de estos efectos tales como: las maniobras de contracción muscular, los trajes anti-G, los equipos de

respiración a presión positiva y el entrenamiento en centrífuga. Las conclusiones en este aspecto y las recomendaciones pueden ser:

- 1) El efecto G-LOC o pérdida de conciencia inducida por la fuerza G puede ocurrir en la aviación propulsada si los pilotos no toman las debidas precauciones. Es importante mantener los arneses bien ajustados.
- 2) La pérdida de memoria provocada por G-LOC deja al piloto indefenso por el estado de inconsciencia que conlleva y le crea una percepción falsa de cómo debe actuar en esas condiciones.
- 3) Para evitar el G-LOC y favorecer la tolerancia a la fuerza G los pilotos han de tener buena salud, preparación y aptitudes, experiencia, entrenamiento, y realizar bien las maniobras asociadas a la contracción muscular.

Agradecimiento: fotos cedidas por la Oficina de Relaciones Sociales y Comunicación del Ejército del Aire. ●

■ Bibliografía ■

- Romero de Tejada y Picatoste M. Aceleraciones. En: Manual de fisiología aeronáutica: nociones de equipos de soporte de vida, paracaidismo, supervivencia y primeros auxilios. Quirón; 1994, p. 94-104.
- Velasco Díaz C. Vuelo en altitud: respiración y circulación sanguínea. En: Medicina aeronáutica: actuaciones y limitaciones humanas. Paraninfo; 1995. p. 40-4.
- Guyton AC, Hall ED. Aviation, high-altitude and space physiology. En: Textbook of medical physiology. 11 edición. Elsevier; 2006, p. 537-43.
- González A, Ríos F. Efectos de las aceleraciones positivas en el organismo humano. Medicina Aeroespacial y Ambiental 2002; 3:222-31.
- Pérez Sastre JM, Moreno Millán E, Ortiz García P. Manual sanitario para tripulantes de cabina de pasajeros. 2ª edición. Arán Ediciones; 2009.
- Scott JM, Esch BT, Goodman LS, Bredin SS, Haykowsky MJ, Warburton DE. Cardiovascular consequences of high-performance aircraft maneuvers: implications for effective countermeasures and laboratory-based simulations. Appl Physiol Nutr Metab 2007; 32:332-9.
- Voge VM. Acceleration forces on the human subject. Aviat Space Environ Med 1980; 51:970-80.
- Patterson R, Rayman RB. Medicina aeroespacial: efectos de la gravedad, la aceleración y la microgravedad en el entorno aeroespacial. En: Byrd LM, director del capítulo. Industria del transporte y el almacenamiento. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. p. 18-22.
- Hodkinson PD. Acute exposure to altitude. J R Army Med Corps 2011; 157:85-91.
- Stein M. Development of an experimental design for anti-G suits in a human centrifuge. German Federal Ministry of Defence. Annual Research and Technology Report 2008; 78-9.
- Alonso Rodríguez C, López Soriano AV. Cuarta generación de aviones de combate. Implicaciones médico-aeronáuticas. Revista de Aeronáutica y Astronáutica 2007; 766:702-10.

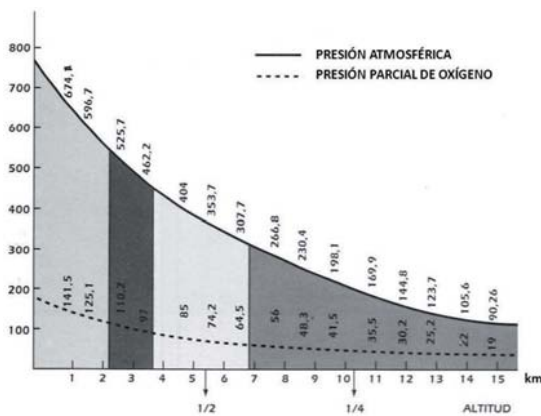
ANEXO

CUADRO I

LA ATMÓSFERA

La figura 9 indica las presiones a diferentes alturas, con referencia al nivel del mar (760mm de Hg). La figura 10 representa las divisiones físicas de la atmósfera, según las características térmicas de cada región. Estas divisiones son las siguientes:

■ Figura 9 ■



Presión, según altura, con referencia al nivel del mar.

La **homosfera**, que se divide a su vez en troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera; alcanza hasta los 200 km de altura.

La **heterosfera**, que alcanza hasta los 1000 km; su temperatura es elevada de forma que los gases se encuentran en estado atómico o ionizado.

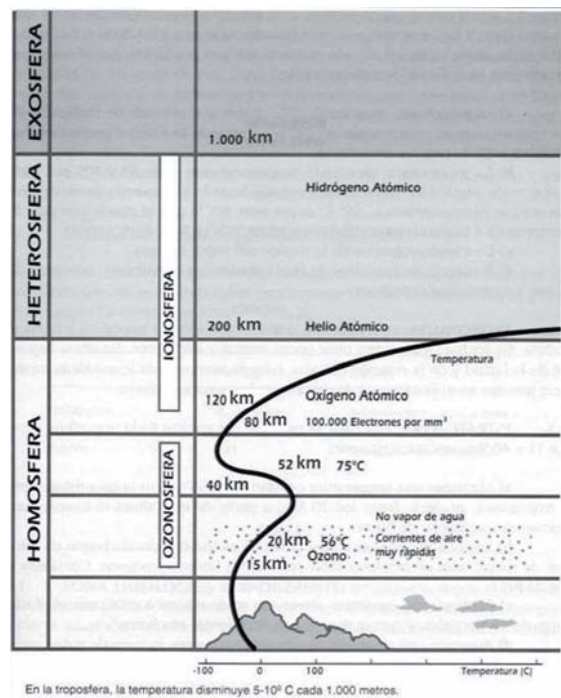
La **exosfera**, que es, el límite superior (alcanza los 1800 km) y hasta ahora la menos conocida, se continua con el espacio exterior.

La **troposfera** o capa más próxima a la superficie de la tierra que alcanza unos 15 km de media, variable por el calentamiento del aire producido por el sol y se caracteriza por:

- la proporción de gases es constante aunque disminuya el número de moléculas, por lo que la presión va disminuyendo con la altitud;
- la temperatura desciende a razón de 5 a 10° C por cada 1000 metros y en la tropopausa se estabiliza a -55° C;
- hay un descenso progresivo de la presión de vapor de agua;

- existen corrientes de aire, turbulencias convectivas, presencia de nubes y meteorología variable.

■ Figura 10 ■



Divisiones físicas de la atmósfera.

La **estratosfera** llega hasta los 40 km y se caracteriza por lo siguiente:

- a partir de los 20 km la temperatura aumenta de nuevo,
- contiene la ozonosfera rica en ozono por acción de la radiación UV con átomos de oxígeno, que comienza a los 23 km,
- existen corrientes aéreas llamadas "corrientes de chorro",
- hay ausencia de vapor de agua y por lo tanto de nubes.

La **mesosfera** con muy baja ionización, que llega a los 80 km; la temperatura aumenta alcanzando 75° C a 52 km y descendiendo después hasta los - 80° C.



La **termosfera**, en la que vuelve a aumentar la temperatura enormemente y también la ionización.

La ozonosfera, entre los 30 y 50 km, está a unos -35°C por el calor producido al convertirse el ozono en oxígeno por la acción solar. En la estratosfera el oxígeno molecular absorbe UV y da lugar a dos átomos de oxígeno y así forma ozono. Estas transformaciones de forma controlada permiten la absorción completa de la radiación UV solar. Si, por los contaminantes terrestres, baja el contenido de ozono, no se filtra la radiación y da lugar a efectos nocivos sobre los organismos vivos.

La tabla 2 subdivide la atmósfera fisiológicamente de la forma siguiente:

Los primeros síntomas que aparecen al aumentar la altura están relacionados con el oído medio y los senos paranasales. Igual ocurre durante el descenso si el organismo no es capaz de compensar las variaciones de presión.

En la zona no totalmente fisiológica se pueden distinguir otras dos:

- De 3000 a 7000 metros, en la que el organismo puede compensar de forma completa con el oxígeno.
- A partir de los 7000 hasta los 15000 metros, con una compensación incompleta en la que hay que aportar obligatoriamente oxígeno debido al descenso de presión atmosférica.

Además otro problema es la descompresión aguda y los problemas que causan los gases atrapados en cavidades cerradas o semicerradas del organismo. La supervivencia en estas condiciones pasa por el suministro de oxígeno y las cabinas presurizadas. A altitudes mayores se requiere traje de presión.

La zona equivalente espacial o crítica llega a los 190 km aunque el cambio de presión es pequeño. Es el límite de la compensación completa al respirar oxígeno puro y hay que realizar una denitrogenación previa para evitar disbarismos. Es necesario el uso de cabinas herméticas y/o trajes de presión, como en los vuelos espaciales, para evitar problemas de ebullición de la sangre y líquidos corporales, como ocurriría a partir de los 19000 metros.

Tabla 2 División fisiológica de la atmósfera

ALTURA	PRESION ATMOSFÉRICA (mm Hg)	ZONA
50000 pies-1000 millas	87-0	Equivalente espacial o crítica
12000-50000 pies	483-487	No totalmente fisiológica o deficiente fisiológica
Nivel del mar-12000 pies	760-483	Fisiológica o indiferente

CUADRO II

EL AMBIENTE ESPACIAL

La transición atmósfera-espacio orbital

La atmósfera que posibilita la vida en la Tierra depende de la fuerza de atracción terrestre o gravedad y de la radiación térmica solar, lo que produce un decrecimiento continuo de densidad y presión barométrica con la altitud.

A 700 km de la superficie terrestre, límite entre la Tierra y el espacio, las colisiones de las partículas resultan inmensurables. Por encima, está la exosfera, que es una zona donde las partículas de aire se mueven libremente.

En el área de transición o "borde espacial" se distinguen 2 zonas importantes:

a) La línea de Karman, a unos 80 km, que representa la máxima altitud a la que una aeronave puede ascender bajo el control aerodinámico de su estructura. Por encima, la dirección de los vehículos espaciales se realiza mediante jets a reacción.

b) Entre los 180 y 200 km la resistencia del aire es insignificante y se considera el límite mecánico entre la atmósfera y el espacio (los vuelos tripulados en órbita alrededor de la Tierra se mueven entre los 240 y 500 km de altitud). Los vehículos espaciales van provistos de soporte adecuado frente a: la ausencia de atmósfera, los efectos de las radiaciones y una potencial colisión con objetos espaciales pequeños (micrometeoritos). Por tal razón, se han adoptado apantallamientos en los vehículos y trajes de protección que previenen de cualquier incidente.

Efecto de los campos de fuerzas

Las fuerzas inerciales y rotacionales que actúan sobre un astronauta en vuelo orbital son de dos tipos:

a) Las aceleraciones y deceleraciones producidas en el lanzamiento del vehículo espacial y cuando el vehículo se introduce de nuevo en la atmósfera terrestre.

En los vuelos espaciales más recientes (estaciones espaciales) no se han superado +3,4 G en la aceleración y -1,2 G en la deceleración (en sentido cabeza-pies). No obstante, al ser durante un periodo de tiempo elevado (17 a 20 minutos), implica importantes adaptaciones a nivel del sistema cardiovascular.

b) La ausencia de gravedad, cuando el vector de fuerza gravitacional queda equilibrado por la fuerza centrífuga que expe-

rimenta el vehículo espacial durante su trayectoria tangencial a la superficie terrestre.

Los efectos biológicos de la gravedad cero son objetivables y afectan a la mayor parte de las funciones corporales. La ausencia de gravedad implica que:

- el manejo de cargas resulte extremadamente facilitado (las cosas vuelan);
- cada movimiento requiera un tiempo de aprendizaje;
- la movilidad esté facilitada (los astronautas se mueven como si nadasen).

Radiaciones

Los rayos cósmicos son mayoritariamente partículas cargadas de origen solar, galáctico y extragaláctico con un rango de energía que cubre 15 órdenes de magnitud (10^5 eV para las partículas del viento solar y 10^{20} eV para las extragalácticas). Esta radiación, cuyas principales características son la aceleración y su transporte en el espacio, presenta dos componentes: una estacionaria, que es el viento solar, y otra intermitente formada por las partículas solares energéticas.

Las radiaciones que pueden afectar a los vuelos orbitales son las siguientes:

- Radiación cósmica galáctica (GCR) de partículas originadas fuera del sistema solar. Por su alta energía, en ocasiones superior a 10^{19} eV, no es fácil detener un flujo de baja densidad de partículas cósmicas. Esta radiación transporta información de regiones remotas del medio interplanetario (según intensidad y dirección de flujo) y una medida indirecta de ello es la lluvia de partículas secundarias en su interacción con la atmósfera.
- Radiación atrapada, compuesta de electrones y protones de emisiones solares captada por el campo geomagnético terrestre.
- Llamadas solares (SPE por sus siglas en inglés): son impredecibles y variables en su intensidad, composición, energía (hasta 10^9 eV) y duración. Sus efectos pueden apreciarse en toda la atmósfera, incluso a nivel de la superficie terrestre.
- El Viento Solar (SW), compuesto principalmente por protones con energías por debajo de los 10^8 eV, que presentan una dirección dominante y variaciones periódicas de intensidad en ciclos de 11 años.