

**Post Print Version:**

González, A.; Ríos, F. Efectos de las Aceleraciones Positivas en el Organismo Humano. *Medicina Aeroespacial y Ambiental* 2002, Vol. 3 (5): 222-231

**Título:** Efectos de las aceleraciones positivas en el organismo

**Title:** Effects of positive accelerations on the human organism

**Autores:** Àngel González-Sistal. Departamento de Ciencias Fisiológicas II. Facultad de

Medicina. Universidad de Barcelona

Francisco Ríos Tejada. Centro de Instrucción de Medicina Aeroespacial. Madrid

**Dirección para la correspondencia:**

Dr. Àngel González-Sistal  
Departament de Ciències Fisiològiques II  
Facultad de Medicina. Universidad de Barcelona  
C/ Feixa Llarga, s/n. Pavelló de Govern. 4<sup>a</sup> planta  
08907 l'Hospitalet de Llobregat (Spain)  
Tel. +34-93-4029088  
e-mail: [angelgonzalez@ub.edu](mailto:angelgonzalez@ub.edu)

**Título:** Efectos de las aceleraciones positivas en el organismo humano

**Resumen:** El artículo describe los efectos de las aceleraciones positivas (+Gz) sobre el organismo humano. Se consideran los factores determinantes de las aceleraciones: intensidad, velocidad de comienzo, dirección y duración. La fisiopatología describe los factores hidrostáticos, hemodinámicos y de regulación refleja del aparato cardiocirculatorio. La exposición a +Gz produce reacciones adaptativas fisiológicas. Cuando éstas se superan, aparecen patologías de tipo cardiocirculatorio, respiratorio, músculoesquelético, nervioso, sensorial,... Se describen los diferentes procedimientos y equipos específicos que protegen al piloto de los efectos de +Gz. Éstos incluyen las maniobras de contracción muscular, los trajes anti-G, los equipos de respiración a presión positiva, así como el entrenamiento en centrífuga.

**Palabras clave:** Aceleraciones positivas. Tolerancia a +Gz. Pérdida de conciencia. Pérdida de visión. Trajes anti-G. PBG. Centrífuga humana.

**Title:** Effects of positive accelerations on the human body

**Summary:** The article describes the effects of positive accelerations (+Gz) on the human organism. The factors that determine the accelerations are: level, onset rate, direction and duration. The physiopathology describes the hydrostatic, haemodynamic factors and reflected regulation on the cardiocirculatory system. The +Gz stress causes adaptative physiological reactions. When they are exceed appear cardiocirculatory, pulmonary, musculoskeletal, nervous and sensory disturbances. Different procedures and specific equipment are described to protect the pilot of these +Gz effects. These include anti-G straining maneuvers, anti-G suits, positive pressure breathing equipment and centrifuge training.

**Key words:** Positive accelerations. +Gz tolerance. Loss of consciousness. Blackout. Anti-G suits. PBG. Human centrifuge.

## ÍNDICE

### PARTE I

1. INTRODUCCIÓN
2. CONCEPTO Y FACTORES DETERMINANTES
  - Intensidad
  - Velocidad de comienzo
  - Dirección
  - Duración
3. FISIOPATOLOGÍA DE LOS EFECTOS DE LAS ACELERACIONES POSITIVAS
  - 3.1. Factores hidrostáticos
  - 3.2. Factores hemodinámicos
    - Cardiovasculares
    - Pleuropulmonares
    - Cerebrovasculares
    - Renales
  - 3.3. Regulaciones reflejas
  - 3.4. Factores biomecánicos

### PARTE II

4. PATOLOGÍA ASOCIADA A LAS ACELERACIONES POSITIVAS
  - 4.1. Cardiocirculatoria
    - Taquicardia
    - Alteraciones electrocardiográficas
    - Arritmias
    - Alteraciones vasculares
  - 4.2. Respiratoria
    - Disnea
    - Atelectasias
    - Neumotórax
  - 4.3. Musculoesquelética de la columna cervical
    - Lesiones agudas de los tejidos blandos
    - Lesiones agudas del cuerpo vertebral y disco intervertebral
    - Enfermedades crónicas degenerativas
  - 4.4. Nervioso
    - Pérdida de conciencia
  - 4.5. Sensorial
    - Alteraciones visuales
    - Alteraciones de la orientación espacial
    - Alteraciones vestibulares
5. MEDIOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LAS ACELERACIONES POSITIVAS
  - Maniobras de contracción muscular
  - Trajes anti-G
  - Respiración a presión positiva
  - Entrenamiento en centrífuga humana
6. BIBLIOGRAFÍA

## **EFFECTOS DE LAS ACELERACIONES POSITIVAS EN EL ORGANISMO (Parte I)**

### **1. INTRODUCCIÓN**

Los efectos de las aceleraciones en el organismo humano han sido motivo de trabajos originales y revisiones en la literatura médico-aeronáutica. No obstante, las nuevas demandas operacionales de aeronaves de caza de cuarta generación, así como los requisitos para los pasajeros que en un futuro no muy lejano vayan a realizar vuelos comerciales de tipo suborbital o la actividad deportiva en una aeronave de prestaciones militares justifica el interés de esta revisión. Ésta se centra en los efectos de la aceleraciones positivas sobre el organismo y las medidas que contrarrestan los efectos deletéreos de las aceleraciones.

### **2. CONCEPTO Y FACTORES DETERMINANTES**

#### **Concepto**

El hombre en la superficie de la tierra está sometido a la fuerza constante de la gravedad. Ésta se denomina fuerza G y su valor estándar es de  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Las aceleraciones se clasifican en: lineal, radial y angular. La lineal es la variación de la velocidad lineal, sin cambio de dirección, respecto al tiempo. La radial o centrípeta se produce al cambiar la dirección del cuerpo o del avión. La angular representa la rotación alrededor del eje central del cuerpo.

El despegue de una aeronave, las maniobras de aproximación o viraje, las maniobras acrobáticas o el entrenamiento en centrífuga humana son ejemplos de aceleraciones a las que se ve sometido un piloto de aeronave.

#### **Factores determinantes**

Éstos se clasifican en:

- Intensidad: es la fuerza de inercia de sentido opuesto a la fuerza de la gravedad. Se representa por la unidad G (1G, 2G,...).

- **Velocidad de comienzo:** es la variación de la intensidad en el tiempo (G/segundo). Conceptualmente existen dos tipos dependiendo de la rapidez en la instauración de la misma. Se utiliza la denominación anglosajona “rapid onset rate” (ROR) y “gradual onset rate” (GOR), que equivalen a velocidades de comienzo de 1G/s y de 0.1G/s respectivamente.
- **Dirección:** la aceleración que actúa en el eje Z del organismo con una fuerza de inercia craneocaudal se denomina +Gz. Es la que nos va a interesar por sus repercusiones fisiopatológicas<sup>1</sup>.
- **Duración:** la aceleración sostenida se define como el vector G que se manifiesta durante más de 1 segundo. La tolerancia a la aceleración es el tiempo que un individuo puede permanecer en exposición continua a una determinada intensidad de G.

### **3. FISIOPATOLOGÍA DE LOS EFECTOS DE LAS ACELERACIONES POSITIVAS**

#### **3.1. Factores hidrostáticos**

Una persona en pie e inmóvil tiene una presión arterial sistólica cardíaca de 120 mmHg y de 190 mmHg en los pies. Esta diferencia se debe al efecto de la presión hidrostática que equivale al peso de la sangre arterial entre el corazón y los pies. La presión hidrostática en un punto depende de su altura respecto a la línea cardíaca, denominada columna de sangre o hidrostática.

La inclinación del asiento de los pilotos mejora la tolerancia a +Gz porque reduce la columna de presión hidrostática (equivale a la altura corazón-cerebro)<sup>2</sup>. Por ejemplo, una inclinación de 13° corresponde a una altura de 29 cm. Si el asiento se inclina a 75° la altura es de 14.5 cm. La disminución de la presión arterial por encima de la línea cardíaca será menor al aumentar la intensidad de +Gz. La aparición de síntomas visuales y de pérdida de conciencia se retrasarán.

## 3.2. Factores hemodinámicos

### Cardiovasculares

La fuerza de inercia igual y de sentido contrario a la de aceleración desplaza el volumen sanguíneo en dirección craneocaudal, si hablamos del eje Gz. Se consideran dos sectores en relación a la línea cardíaca:

1. Encima del corazón la hipovolemia provoca una disminución de la presión arterial. El déficit de perfusión sanguínea de la retina y del cerebro se manifiesta por síntomas visuales y/o pérdida de conciencia<sup>3</sup>.

2. Debajo del corazón la sangre se dirige hacia la periferia de las extremidades. El retorno venoso en dirección al corazón disminuye. El gasto cardíaco se regula por la actividad contráctil del corazón y el retorno venoso. La figura 1 muestra la disminución del gasto cardíaco en relación a la intensidad de +Gz. La presión arterial aumenta progresivamente hacia la periferia de las extremidades por efecto de la presión hidrostática. Ésto favorece la vasodilatación venosa y el aumento de la presión intravascular capilar que se manifiesta por edema y hemorragias petequiales cutáneas.

El organismo responde a la caída aguda de la presión arterial. La regulación de la circulación se realiza a través del sistema nervioso simpático que se distribuye por los vasos sanguíneos. La inervación de las arterias pequeñas y de las arteriolas provoca vasoconstricción y aumento de la resistencia periférica total. Las hormonas segregadas por las terminaciones nerviosas (noradrenalina y adrenalina) potencian la vasoconstricción arteriolar. La inervación de las paredes venosas disminuye el volumen sanguíneo contenido en las venas y lo desplaza hacia el corazón. Las fibras simpáticas inervan el corazón, aumentan su actividad contráctil y su frecuencia cardíaca. La figura 2 muestra el aumento de la frecuencia cardíaca en relación a la intensidad de +Gz. Este aumento no es lineal y es consecuencia de la regulación hemodinámica para compensar el bajo gasto cardíaco y la caída de la presión arterial. La inervación del corazón altera la morfología de las ondas electrocardiográficas, el ritmo y la conducción cardíaca<sup>4</sup>. Debido al comportamiento del

sistema nervioso autónomo existe una distribución de arritmias durante y postexposición a +Gz con un predominio del simpático y parasimpático respectivamente. La respuesta nerviosa es capaz de aumentar la presión arterial de dos a tres veces su valor en 5-10 segundos.

Los órganos abdominales y las extremidades inferiores son un reservorio de sangre venosa. Las maniobras de contracción muscular isométricas en piernas, brazos y abdomen facilitan el desplazamiento del reservorio venoso hacia el corazón. Éstas forman parte de las denominadas maniobras M-1 o L-1 y constituyen un factor adicional de protección junto a medios artificiales como el pantalón anti-G.

### **Pleuropulmonares**

La distribución del flujo sanguíneo a lo largo del pulmón se afecta por la exposición a aceleraciones superiores a 4 +Gz. Los valores medios de la presión de la arteria y vena pulmonar, en el límite entre el tercio medio y basal pulmonar, son 15 mmHg (20 cmH<sub>2</sub>O) y 0 mmHg respectivamente. Este valor difiere por encima y debajo de éste nivel debido al efecto de la presión hidrostática. La presión arterial media es de 0, 20 cmH<sub>2</sub>O, y de 5 cmH<sub>2</sub>O encima del límite medio-basal del pulmón para 1 y 4 +Gz respectivamente. La porción de pulmón no perfundida en el ápex se incrementa con la aceleración +Gz. Por el contrario, el progresivo aumento de presión en la base pulmonar incrementa el flujo proporcionalmente a la aceleración +Gz aplicada<sup>5</sup>.

Al aumentar la intensidad de +Gz se produce un gradiente de presión pleural desde el ápex hacia la base pulmonar. La presión pleural, a 5 +Gz, es 30 cmH<sub>2</sub>O mayor en la base que en el vértice pulmonar. Así, los alveolos en el ápex están más expandidos que en la base donde tendrán un volumen mínimo. Este efecto se acentúa con la utilización del traje anti-G. El inflado a nivel abdominal eleva el diafragma, comprime las bases pulmonares y provoca la disminución de la capacidad funcional residual. El ápex está ventilado pero no perfundido ya que los alveolos se expanden pero la presión pleural es baja y esto añade un espacio muerto. Por el contrario, la base pulmonar no está ventilada pero sí perfundida. Ésto contribuye a que el oxígeno atrapado en los

alveolos de las bases se intercambie rápidamente hasta igualar la presión de la sangre venosa mixta. La consecuencia anatómica es el colapso de los alveólos basales y por tanto la presencia de atelectasias<sup>6</sup>. La sangre circulante alrededor de estos alveólos no funcionantes constituye un cortocircuito derecha-izquierda. La proporción de volumen sanguíneo de éste corresponde al incremento de la intensidad de +Gz. Esta proporción a 5 +Gz es aproximadamente del 50%. Este cortocircuito derecha-izquierda reduce la saturación de oxígeno arterial, la desaturación es del 85%. La frecuencia respiratoria aumenta con la intensidad de +Gz. Se observa en la figura 3 como ésta se duplica.

El neumotórax espontáneo se produce por la ruptura de pequeñas bullas (generalmente localizadas en los vértices pulmonares) debido a la diferencia de presión que se produce entre éstas y exterior del pulmón. La utilización de respiración a presión positiva podría facilitar la rotura de pequeños alveolos o bullas, sobre todo si se trata de un pulmón patológico (blebs, enfisema).

### **Cerebrovasculares**

El cerebro recibe irrigación sanguínea de las arterias carótidas internas y vertebrales. La arteria oftálmica, que irriga a la retina, se origina de la arteria carótida interna. A pesar de que la irrigación cerebral y ocular están interrelacionadas existen diferencias respecto a su regulación.

La perfusión sanguínea cerebral no varía significativamente si su presión arterial se mantiene dentro del rango 60-140 mmHg. Además de este mecanismo de autorregulación<sup>7</sup>, el aumento de la concentración de dióxido de carbono y de hidrogeniones vasodilata a los vasos cerebrales para eliminar a estos compuestos. Cuando la presión arterial cerebral cae por debajo de 60 mmHg se suma a lo anterior un gradiente de presión sanguínea entre la arteria carótida y la vena yugular. La pérdida de conciencia se produce a partir de una intensidad de 6 +Gz.

La perfusión ocular no se beneficia de este mecanismo de autorregulación. Cuando la presión de la arteria oftálmica cae por debajo de la presión intraocular (8-22 mmHg) aparecen los síntomas visuales a una intensidad entre 3 y 5 +Gz.

## **Renales**

El flujo sanguíneo renal consta de un mecanismo de autorregulación que controla la excreción de agua y solutos plasmáticos. La composición del plasma se detecta en la zona proximal del túbulo distal (la mácula densa). Cuando se filtra demasiado líquido las señales de la mácula densa producen la vasoconstricción de las arterias renales aferente y eferente. De esta manera disminuye el flujo renal y el filtrado glomerular<sup>8</sup>. La disminución del gasto cardíaco y de la presión arterial provoca oliguria e hiponatriuria. El traje anti-G, las maniobras M-1 o L-1 y la vasoconstricción simpática disminuyen el flujo renal.

### **3.3. Regulaciones reflejas**

La recuperación de la presión arterial se debe a la activación de los reflejos de los barorreceptores. Éstos se localizan en las paredes de las grandes arterias sistémicas y activan al sistema nervioso simpático al disminuir la presión arterial, lo que se denomina reflejo cardiovascular<sup>9</sup>.

Los quimiorreceptores son células sensibles al déficit de oxígeno y al exceso de dióxido de carbono o de hidrogeniones. Éstos se localizan en la bifurcación carotídea y en la arteria aorta. Se estimulan cuando la presión arterial desciende por debajo de 80 mmHg y junto a los barorreceptores activan al sistema nervioso simpático.

Los receptores de distensión o de baja presión se localizan en las aurículas y en las arterias pulmonares. Se activan cuando disminuye el volumen sanguíneo en estas localizaciones y se suman al efecto de los barorreceptores y quimiorreceptores.

La velocidad de comienzo de +Gz determina la efectividad del reflejo cardiovascular. Los barorreceptores compensan el aumento de la intensidad de +Gz si la velocidad de comienzo es gradual (GOR). En cambio para una velocidad de comienzo rápida (ROR) la compensación es más lenta.

### **3.4. Factores biomecánicos**

La exposición a +Gz provoca lesiones cervicales agudas y cambios vertebrales degenerativos crónicos. Los músculos y ligamentos cervicales (tejidos blandos) contribuyen al movimiento de la cabeza y protegen, de manera limitada, a las vértebras y discos intervertebrales<sup>10</sup>.

Los músculos extensores o antigrauatorios del cuello son el principal grupo muscular que protege a la columna cervical de la exposición a +Gz. El porcentaje de contracción voluntaria máxima (% MVC) es un criterio fisiológico que expresa la limitación de contracción muscular. Éste se cuantifica mediante electromiografía.

Los segmentos vertebrales C4-5, C5-6 y C6-7 corresponden a los puntos de máxima flexión de la columna cervical y a localizaciones comunes de cambios degenerativos crónicos.

## **EFFECTOS DE LAS ACELERACIONES POSITIVAS EN EL ORGANISMO (Parte II)**

### **4. PATOLOGÍA ASOCIADA A LAS ACELERACIONES POSITIVAS**

#### **4.1. Cardiocirculatoria**

##### **Taquicardia**

La frecuencia cardíaca aumenta con la intensidad de  $+Gz$ <sup>11</sup>. Los valores alcanzados con GOR son menores que para ROR. La frecuencia cardíaca durante el entrenamiento en la centrífuga tiene un pequeño papel predictivo de tolerancia a  $+Gz$ , los individuos con un valor bajo desde el principio toleran exposiciones prolongadas. Si durante el entrenamiento se alcanzan taquicardias superiores a 200 latidos/minuto puede indicar la finalización de la exposición a  $+Gz$ .

##### **Alteraciones electrocardiográficas**

La exposición a  $+Gz$  altera la morfología de las ondas electrocardiográficas<sup>12</sup>.

La onda P corresponde a la despolarización auricular. Su amplitud aumenta con la intensidad de  $+Gz$ , especialmente durante la realización de maniobras de combate aéreo. Al finalizar la exposición a  $+Gz$  vuelve a su valor basal en pocos minutos, si desaparece se debe a una excesiva inhibición vagal sobre el nódulo sinusal del corazón.

El complejo QRS corresponde a la despolarización ventricular. La amplitud de la onda S aumenta mientras que la onda R disminuye durante la exposición a  $+Gz$ . Ambas regresan a su valor basal prácticamente al mismo tiempo que la onda P.

La onda T corresponde a la repolarización ventricular. Su amplitud disminuye durante la exposición a  $+Gz$ . Es característico que al realizar maniobras de combate aéreo su morfología sea más alargada. Una vez finaliza la exposición a  $+Gz$  es la última en volver a su valor basal.

##### **Arritmias**

Las arritmias más comunes asociadas a  $+Gz$  son: la arritmia sinusal, las extrasístoles auriculares y ventriculares. El sistema nervioso simpático predomina durante la exposición a  $+Gz$ , da lugar a

extrasístoles auriculares y ventriculares. Mientras que el parasimpático lo hace al finalizar la exposición a +Gz con bradicardia sinusal, ritmo auricular ectópico y disociación aurículo-ventricular<sup>13</sup>. Estas arritmias pueden ser asintomáticas o cursar con disnea y/o dolor retroesternal. El sistema cardiovascular se expone a un estrés máximo durante ROR y en maniobras de combate aéreo, lo que conlleva una mayor incidencia de arritmias.

El bloqueo sinoauricular retrasa o impide la despolarización auricular. El bombeo cardíaco puede ser insuficiente para mantener una perfusión cerebral adecuada y se producirá la pérdida de conciencia. Si ésto coincide con la pérdida de conciencia se prolongará el período de incapacitación. Esta arritmia se puede desencadenar por una realización incorrecta de la maniobra de contracción muscular isométricas, denominadas M-1 o L-1.

La disociación aurículo-ventricular se caracteriza por una mayor frecuencia ventricular que auricular. Ésto conlleva a la pérdida de la función auricular y a la disminución de la presión hasta 30 mmHg en la aurícula. La consecuencia inmediata es la pérdida de visión o de conciencia.

La taquicardia ventricular sostenida (superior a 30 segundos) puede derivar en fibrilación ventricular. Supondría el fallo de la función cardíaca y el consecuente síncope.

### **Alteraciones vasculares**

La movilidad del cuerpo disminuye al aumentar la intensidad de +Gz. La progresiva inmovilización de las extremidades inferiores favorece la éstasis de sangre en la periferia de éstas y el aumento de la presión arterial. Las venas se vasodilatan y se produce la extravasación de plasma hacia los tejidos que se manifiesta por edema en piernas y tobillos<sup>14</sup>. El incremento de la presión intravascular favorece la ruptura de los capilares y con ello las hemorragias petequiales cutáneas<sup>15</sup>. La posición del piloto influye en su localización: en tobillos, pies, piernas y antebrazos si está sentado; en nalgas y espalda si está en decúbito supino. El edema y las hemorragias petequiales aparecen a intensidades entre 5 y 9 +Gz. La inflación del traje anti-G previene ambas

patologías porque comprime las extremidades inferiores e impide la extravasación del plasma hacia los tejidos y el aumento de la presión intravascular.

El pantalón anti-G y las maniobras de contracción muscular disminuyen el flujo renal. El déficit de flujo sanguíneo en los riñones durante un tiempo prolongado lesiona a sus tejidos y se manifiesta por proteinuria <sup>16</sup>.

El hematoma escrotal se asocia a la realización de maniobras de combate aéreo y se produce por el aumento de la presión intravascular y la ruptura de vasos del escroto.

El dolor de brazos se produce por la disminución de la movilidad y la éstasis de sangre en las extremidades superiores, se manifiesta a partir de 6 +Gz. La utilización de sistemas de presión positiva puede generar dolor adicional, al aumentar la tensión arterial y dificultar el retorno venoso al tórax .

## **4.2. Respiratoria**

### **Disnea**

La frecuencia respiratoria aumenta con la intensidad de +Gz, los valores alcanzados con GOR son menores que con ROR.

La taquipnea generada produce sensación de disnea. Las maniobras de combate aéreo aumentan el trabajo inspiratorio significativamente y ocasiona fatiga de la musculatura respiratoria que contribuye a la sensación de disnea<sup>17</sup>.

### **Atelectasias**

La utilización de sistemas de contrapresión (pantalones anti-G) para contrarrestar la deplección sanguínea hacia los miembros inferiores y el inflado a nivel abdominal del pantalón, acelera la caída de la saturación de oxígeno. La presión ejercida sobre el diafragma tiene la consecuencia anatómica del colapso de los espacios bronquialveolares basales y por tanto la presencia de atelectasias. Éstas

se facilitan si el sujeto respira previamente oxígeno al 100%, en este caso no existirá presión correspondiente al nitrógeno lavado y el alveolo libre de gas permanecerá colapsado<sup>18</sup>.

### **Neumotórax**

El neumotórax espontáneo cursa con dolor torácico, disnea, tos seca y/o síncope. El dolor es repentino, punzante y se localiza en la zona superior del tórax o en los hombros. Existe la hipótesis de que la respiración a presión positiva, el oxígeno respirado y el aumento de la intensidad de +Gz hacen a los pulmones más susceptibles a desarrollar un neumotórax espontáneo<sup>19,20</sup>.

## **4.3. Musculoesquelética de la columna cervical**

### **Lesiones agudas de los tejidos blandos**

El dolor, la contractura muscular, el déficit sensorial y/o déficit motor manifiestan la lesión aguda de los músculos y ligamentos<sup>21</sup>.

Los factores asociados a las lesiones agudas son: la edad, las horas de vuelo, la intensidad y la duración de +Gz, la velocidad de comienzo, el porcentaje de contracción voluntaria máxima (%MVC), la posición de la cabeza y las características del equipo de soporte de vida (casco, máscara de oxígeno,...)<sup>22</sup>.

La movilidad de la columna cervical disminuye significativamente a partir de los 35 años. Los movimientos bruscos durante la exposición a +Gz dañan más fácilmente a una columna vertebral que es menos flexible. Los pilotos con mayor número de horas de vuelo acumuladas presentan una incidencia más elevada de patología. Existe la duda si las lesiones agudas se relacionan con la edad o con el número de horas de vuelo.

Las lesiones ocurren durante exposiciones entre 4 y 6 +Gz, debido a que los pilotos pueden mover la columna cervical sin limitación externa. En cambio a medida que +Gz aumenta la movilidad del cuerpo disminuye. Es necesario como mínimo una intensidad de 4 +Gz para que se produzcan lesiones de la columna cervical<sup>23</sup>. Los músculos cervicales se lesionan fácilmente con un MVC

mayor del 70%. El valor del %MVC se reduce con el entrenamiento de los músculos. El casco utilizado actualmente pesa aproximadamente 1000 gramos y minimiza la fuerza de inercia que actúa sobre la cabeza<sup>24</sup>.

### **Lesiones agudas del cuerpo vertebral y disco intervertebral**

La compresión vertebral, la herniación del disco intervertebral y la fractura del cuerpo vertebral se incluyen en este grupo. Éstas se asocian a intensidades de +Gz altas y a las lesiones previas de los tejidos blandos cervicales. Las patologías más frecuentes se localizan en las vértebras C4-5, C5-6 y C6-7. Estos segmentos corresponden a los puntos de máxima flexión de la columna cervical y a localizaciones comunes de cambios degenerativos crónicos. La densidad ósea mineral aumenta con las exposiciones repetidas de +Gz<sup>25</sup>.

### **Enfermedades crónicas degenerativas**

Los osteofitos, la disminución de la densidad de los discos intervertebrales y la estenosis del canal vertebral constituyen este grupo<sup>26</sup>. No hay correlación con la exposición repetida a +Gz sostenida. Existen varias líneas de investigación, estudios retrospectivos y prospectivos encaminados a valorar la incidencia de cambios degenerativos en tripulantes técnicos.

## **4.4. Nervioso**

### **Pérdida de conciencia**

El período de incapacitación absoluta se caracteriza por la no conciencia y convulsiones mioclónicas (dura 12-15s). Se precede de un estado de confusión y desorientación de aproximadamente 10s denominado período de incapacitación relativa. El piloto sufre amnesia lacunar del episodio de pérdida de conciencia<sup>27</sup>. La duración del período de incapacitación total<sup>28</sup> depende de la intensidad de +Gz, la velocidad de comienzo, el daño isquémico/hipóxico del sistema nervioso central y de la realización de maniobras de combate aéreo<sup>29</sup>. El traje anti-G mejora la

tolerancia y por tanto favorece que los episodios de pérdida de conciencia sean menores. Las Figuras 4a y 4b muestran como varia la tolerancia a las altas aceleraciones y area de perdida de conciencia mediante sistemas de protección a las mismas.

## **4.5. Sensorial**

### **Alteraciones visuales**

Se manifiestan de manera progresiva al disminuir el flujo de la arteria oftálmica. La visión tubular es la disminución de la visión periférica, se conserva una zona circular de visión central y aparece con una intensidad entre 3 y 4 +Gz. La visión gris, visión central borrosa, acontece entre 4 y 5 +Gz. La visión negra o ausencia total de la visión tiene lugar entre 5 y 6 +Gz.

La figura 5 muestra la caída de la presión arterial oftálmica en relación a la intensidad de +Gz. Los datos obtenidos provienen de la modelización del sistema cardiovascular y de la simulación digital de los síntomas visuales y la pérdida de conciencia<sup>30,31</sup>.

Cuando se interrumpe el flujo sanguíneo por efecto de +Gz la retina y el cerebro tienen una reserva sanguínea de 5s. Primero cesa la perfusión de la retina ya que la presión intraocular es menor que la presión cerebral. Para una velocidad de comienzo GOR se produce la pérdida total de la visión 0.7G antes que se produzca la pérdida de conciencia. Los pilotos utilizan los síntomas de visión tubular o visión gris como pródromos para evitar la pérdida de conciencia. Esta técnica a medida que la velocidad de comienzo es más rápida es menos apropiada, debido a que los mecanismos compensatorios son demasiado lentos (figura 6). Así la diferencia entre los síntomas visuales y la pérdida de conciencia es cada vez menor al aumentar la velocidad de comienzo<sup>32</sup>.

### **Alteraciones de la orientación espacial**

Fenómenos consecuencia de una incorrecta apreciación de la posición en relación a los tres planos del espacio. Se han descrito específicamente ilusiones vestibulares relacionadas con exposición a altas aceleraciones sobre todo de indole somatográfica como el efecto inversión donde la resultante

de la fuerza gravitoinercial rota hacia a tras y la sensación es de ir hacia abajo. El denominado efecto por exceso de G conduce a una falsa percepción de la posición del cuerpo en la aeronave<sup>33</sup>.

### **Cinetosis**

Los otolitos de los canales semicirculares responden al aumento de +Gz. Éstos estimulan al sistema nervioso parasimpático y provocan nauseas, vómitos, irritabilidad y sudor frío.

El vértigo fisiológico se produce por un exceso de señales visuales, vestibulares o somatosensitivas.

La presencia de cinetosis se asocia a este tipo de vuelos y al entrenamiento en determinados tipos de simuladores<sup>34,35</sup>.

## **5. MEDIOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LAS ACELERACIONES POSITIVAS**

### **Maniobras de contracción muscular**

Los efectos más importantes de las aceleraciones que afectan al eje longitudinal del organismo están condicionados por la disminución de la presión arterial necesaria para mantener un adecuado flujo cerebral y el desplazamiento de una gran masa sanguínea en sentido craneocaudal. Ésto ha de ser contrarrestado para evitar la pérdida de conciencia. Se utilizan dos medios que se apoyan mutuamente para conseguir el efecto más óptimo:

1. El aumento de la presión intratorácica<sup>36</sup>.

2. La contracción muscular de piernas, muslos, abdomen, tórax, brazos y antebrazos. Ésto se favorece con la acción del traje anti-G, cuyo fundamento es evitar el desplazamiento de una gran masa sanguínea hacia las extremidades inferiores.

La técnica de contracción muscular se basa en tres principios fundamentales:

- La maniobra respiratoria de Valsalva. Ésta tiene dos modalidades denominadas maniobra M-1 y L-1. La diferencia está en que con la primera la glotis permanece parcialmente abierta emitiendo un cierto ruido y en la segunda la glotis está cerrada.

- La contracción muscular. Al mismo tiempo que se inspira con la boca, se debe comenzar a contraer toda la musculatura de piernas, muslos, abdomen, brazos y antebrazos. Esta contracción se mantiene durante todo el tiempo en que se sostiene +Gz sobretodo si es un régimen superior a 6 +Gz.
- El tiempo. El ritmo respiratorio se mantiene durante 3 segundos, se expulsa el aire en un segundo y se comienza de nuevo. Este segundo de la fase espiratoria e inspiración profunda permite una ventilación continuada y corregir el retorno venoso.

### **Trajes anti-G**

Los trajes anti-G convencionales denominados de oclusión arterial <sup>37</sup> contrarrestan el efecto de +Gz mediante la inflación de cámaras sobre el abdomen y las extremidades inferiores. La consecuente disminución del diámetro de los vasos sanguíneos aumenta las resistencias periféricas y la presión arterial. El reservorio de sangre venosa en estas localizaciones contribuye a aumentar el retorno venoso hacia el corazón. La compresión de las extremidades inferiores impide la extravasación del plasma hacia los tejidos y el aumento de la presión intravascular. Por tanto, evita el edema y las hemorragias petequiales a este nivel. El inflado de la zona abdominal eleva el diafragma que dificulta el desplazamiento del corazón, de los vasos sanguíneos intratorácicos y disminuye el efecto de la presión hidrostática. Los pantalones anti-G pueden aumentar la tolerancia 1.5 G y se le puede sumar la protección que ejercen las maniobras M-1 o L-1 y la respiración a presión positiva. El sistema Combat Edge provee presión positiva a la máscara de oxígeno. Este sistema dispone de un dispositivo de contrapresión torácica a modo de chaleco anti-G que facilita el trabajo respiratorio<sup>38</sup> El Combat Edge produce un efecto similar a las maniobras de contracción muscular (aumenta la presión intratorácica lo que favorece un mayor volumen cardíaco) pero con menos esfuerzo y menos fatiga, éste permite exponerse a +Gz durante períodos más prolongados. Al chaleco y al dispositivo de contrapresión se añade un pantalón anti-G, con un dispositivo de inflado rápido gracias a la utilización de válvulas de alto flujo.

El traje Advanced Technology Anti-G suit (ATAGS), aunque todavía no es completamente operacional, pretende reemplazar al traje anti-G convencional. Éste envuelve las piernas y la parte inferior del cuerpo con un tejido expansible. La combinación con el Combat Edge permite tolerar entre 8 y 9 +Gz relajados<sup>39</sup>. Si se adiciona un moderado grado de contracción muscular y 55° de inclinación del asiento se alcanza hasta 12 +Gz.

Un nuevo sistema de traje anti-G es el denominado Libelle<sup>40</sup>. El piloto está rodeado de un líquido de la misma densidad del cuerpo que provee una contrapresión proporcional a la fuerza de la gravedad en cada punto del organismo. El traje es autosuficiente ya que no necesita válvulas anti-G ni conectarse a ningún sistema de la aeronave. El traje en centrífuga humana a 5G/s alcanza +12 Gz sin aporte de respiración positiva, si bien operacionalmente su límite se estima en un máximo de 9 +Gz. La realización de maniobras de contracción muscular es menos estresante que con los trajes anti-G convencionales. La tolerancia es muy buena y en gran medida evita el dolor en brazos y muñecas.

### **Respiración a presión positiva**

La respiración a presión positiva, clásicamente se ha utilizado para subvenir las necesidades oxigenativas en altitud. La utilización de presión positiva durante la exposición a altas aceleraciones (PBG) se ha demostrado como un medio eficaz y bien tolerado para mejorar la tolerancia al efecto gravitoinercial de las aceleraciones +Gz, conduciendo a un aumento de su tolerancia. Ello ocurre gracias a la estimulación secundaria de los barorreceptores. La utilización de la PBG a 1 +Gz produce un rápido aumento de la presión arterial debido al incremento de la presión intratorácica<sup>38</sup>. Seguidamente disminuye el retorno venoso y la presión arterial caerá de nuevo. Esta disminución secundaria de la presión activa a los barorreceptores.

La PBG previene el colapso de aire en las vías respiratorias e incrementa la oxigenación por debajo de 8 +Gz en comparación con la maniobra L-1. A diferencia de la L-1 produce menos fatiga y consume menos oxígeno. La maniobra L-1 se correlaciona con una menor presión arterial de oxígeno. Inconvenientes de la PBG es aprender a respirar y comunicarse con presiones superiores a 30-40mmHg, pero sobre todo conduce a una reducción del volumen de reserva inspiratorio, aunque el volumen pulmonar total aumenta. Con objeto de evitar sobredistensión pulmonar la administración de aire o mezcla de aire/oxígeno a presión debe ser contrareestado mediante sistemas de contrapresión torácico. Actualmente las operaciones aéreas en aeronaves de cuarta generación contemplan sistemas integrados de administración de presión positiva, medios de contrapresión integrales incluido brazos y pantalón anti-G<sup>42</sup>.

### **Entrenamiento en centrífuga humana**

La centrífuga humana evalúa la tolerancia a +Gz mediante la respuesta del reflejo cardiovascular en relación a la velocidad angular de inicio<sup>43</sup>. El entrenamiento fisiológico se basa clásicamente en tres perfiles de vuelo diferentes.

El primer perfil valora la tolerancia natural o individual del piloto. Se realiza sin traje anti-G y sin maniobras de contracción muscular. La velocidad de comienzo es baja, de 1G/3s. Se alcanza una intensidad de 5 +Gz hasta que aparece afectación de la visión central.

El segundo perfil tiene por finalidad mantener una buena perfusión de la retina sin que aparezcan síntomas visuales. Ésto para una intensidad de 6 +Gz y durante 30 segundos. La velocidad de comienzo es rápida de 1G/s. El piloto se protege con pantalón anti-G y realiza la maniobra L-1 con la menor fatiga posible.

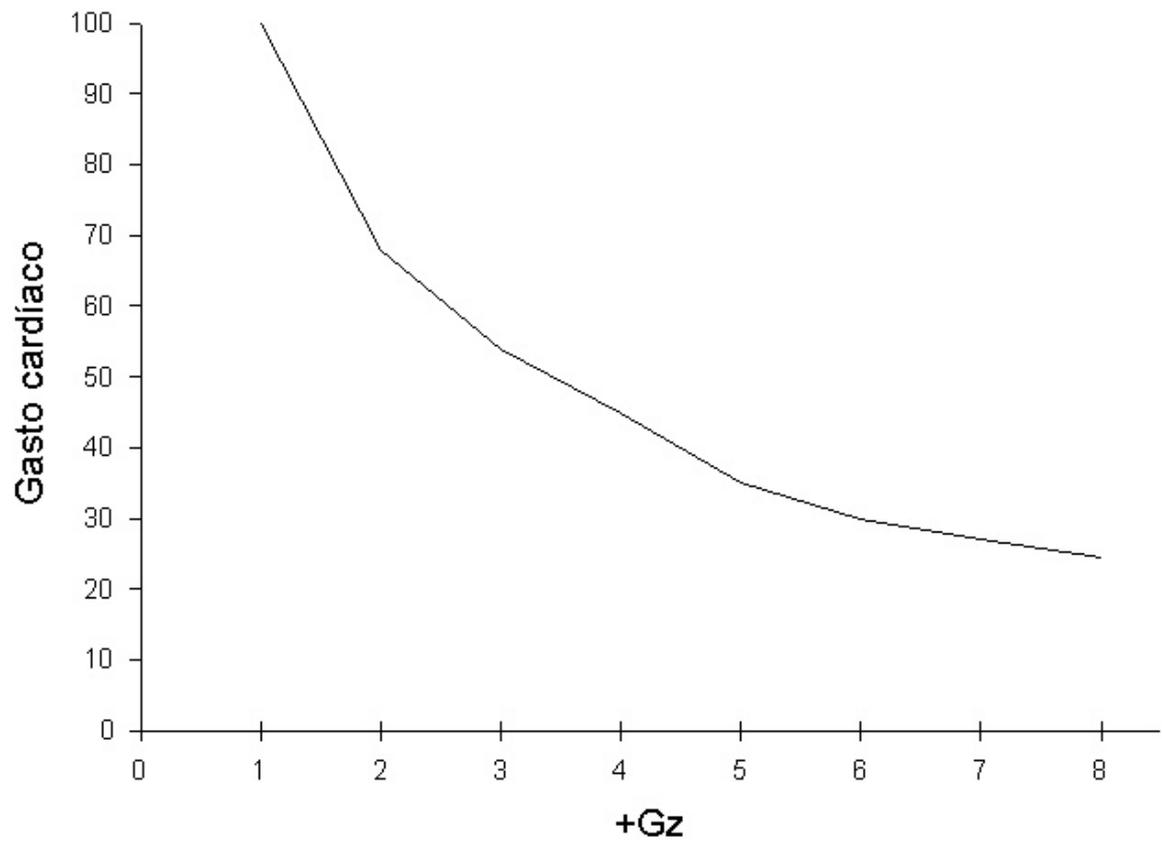
El tercer perfil se denomina perfil de combate. Se realiza con una intensidad entre 7 y 8 +Gz durante períodos de 10-15 segundos. La velocidad de comienzo es rápida, superior a 3G/s. Desde el

inicio utiliza traje anti-G y maniobras de contracción muscular. A diferencia del primer perfil, los dos últimos muestran la tolerancia a +Gz sin la respuesta del reflejo cardiovascular.

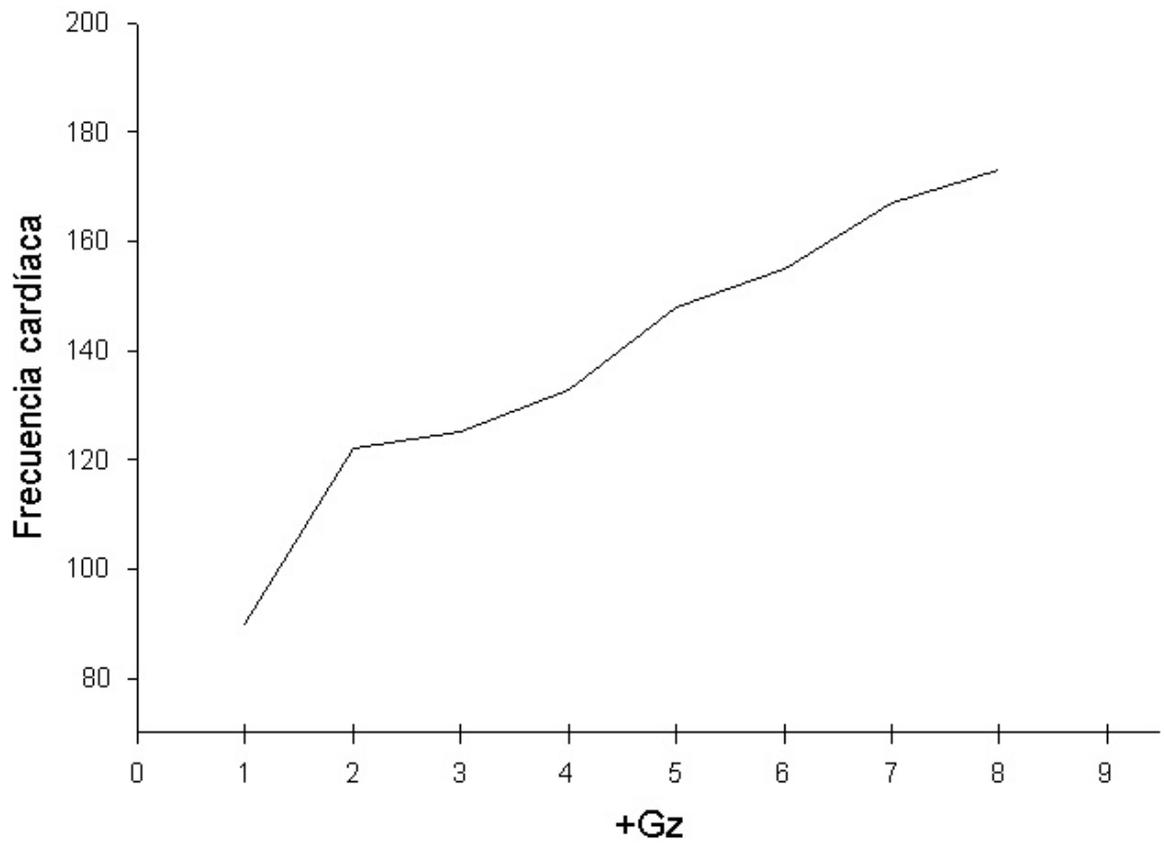
## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Table of equivalents for acceleration terminology, recommended for general use by the aerospace Medical Panel, AGARD. *Aerospace Med.* 1961; 32:1109
2. Burton RR. Mathematical models for predicting straining G-level tolerances in reclined subjects. *J Gravit Physiol.* 1998 Jul; 5(1): P59-62
3. Guillaume A, Osmont D et al. Evaluation of cerebral stresses under acceleration taking into account the lateral ventricles. *J Gravit Physiol.* 1999 Jul; 6(1): P67-8.
4. Whinnery JE. The electrocardiographic response to high +Gz centrifuge training. *Aviat Space Environ Med.* 1990 Aug; 61(8):716-21
5. Chornuk MA, Bernard SL. Effects of inertial load countermeasure on the distribution of pulmonary blood flow. *J Appl Physiol.* 2000 Aug; 89 (2): 445-57
6. Haswell MS, Tacker WA Jr, Balldin UI, Burton RR. Influence of inspired oxygen concentration on acceleration atelectasis. *Aviat Space Environ Med.* 1986 May; 57(5): 432-7
7. Bagshaw RJ, Whinnery JE. Mammalian cardiovascular morphology and the maintenance of cerebral function at high Gz. *Aviat Space Environ Med.* 1994 Jul; 65(7):666-9
8. Norsk P. Gravitational stress and volume regulation. *Clin Physiol.* 1992 Sep; 12(5): 505-26
9. Turski BK, Gembicka-Kuzak DM, Debinski WB, Kuzak W. Relationship between atrial natriuretic peptide (ANP), renin (PRA), aldosterone (PAC), hemodynamic responses to lower body negative pressure (LBNP) and tolerance. *J Gravit Physiol* 1995;2(1):P37-8
10. Vanderbeek RD. Period prevalence of acute neck injury in US Air force pilots exposed to high G forces. *Aviat Space Environ Med.* 1988; 12: 1176-1180.
11. Parkhust , M.S, Leverett, S.D, Jr, Shubrooks, S. Human tolerance to high, sustained +Gz acceleration. *Aerospace Med.* 1972; 43:708
12. Whinnery CC, Whinnery JE. Acceleration-induced electrocardiographic interval changes. *Aviat Space Environ Med.* 1988 Feb; 59(2):102-6
13. Whinnery AM, Whinnery JE, Hickman JR . High +Gz centrifuge training: the electrocardiographic response to +Gz-induced loss of consciousness. *Aviat Space Environ Med.* 1990 Jul; 61(7):609-14
14. Noddeland H, Winkel J. Effects of leg activity and ambient barometric pressure on footswelling and lower limb skin temperature during 8h of sitting. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1988; 57(4): 409-14
15. Whinnery JE. Comparative distribution of petechial haemorrhages as a function of aircraft cockpit geometry. *J Biomed Eng* 1987. Jul; 9(3): 201-5
16. Noddeland H, Myhre K et al. Proteinuria in fighter pilots after high +Gz exposure. *Aviat Space Environ Med.* 1986 Feb; 57(2):122-5
17. Bain B, Jacobs I. Respiration muscle fatigue during simulated air combat maneuvering (SACM). *Anat Space Environ Med.* 1997 Feb; 68(2): 118-25
18. Tacker WA Jr, Balldin UI, Burton RR, Glaister DH, Gillingham KK, Mercer JR. Induction and prevention of acceleration atelectasis. *Aviat Space Environ Med.* 1987 Jan; 58(1):69-75
19. Voge V.M., Anthracite R. Spontaneous pneumothorax in the USAF aircrew population: a retrospective study. *Aviat Space Environ Med.* 1986 Oct.
20. F. Rios, JA Azofra, J Del Valle, A Pujante. Neurological manifestation of AGE following standard altitude training flight: a case report. *ASEM,* 1997;68:1025-1028.
21. Oksa, J., Hamalainen, O. Muscle straining during aerial combat maneuvering exercise. *Aviat Space Environ Med.* 1996; 67: 1138-1143
22. Hamalainen, O., Vanharanta, H. et al. Determinants of +Gz related neck pain: A preliminary survey. *Aviat Space Environ Med.* 1993; 64: 651-652.

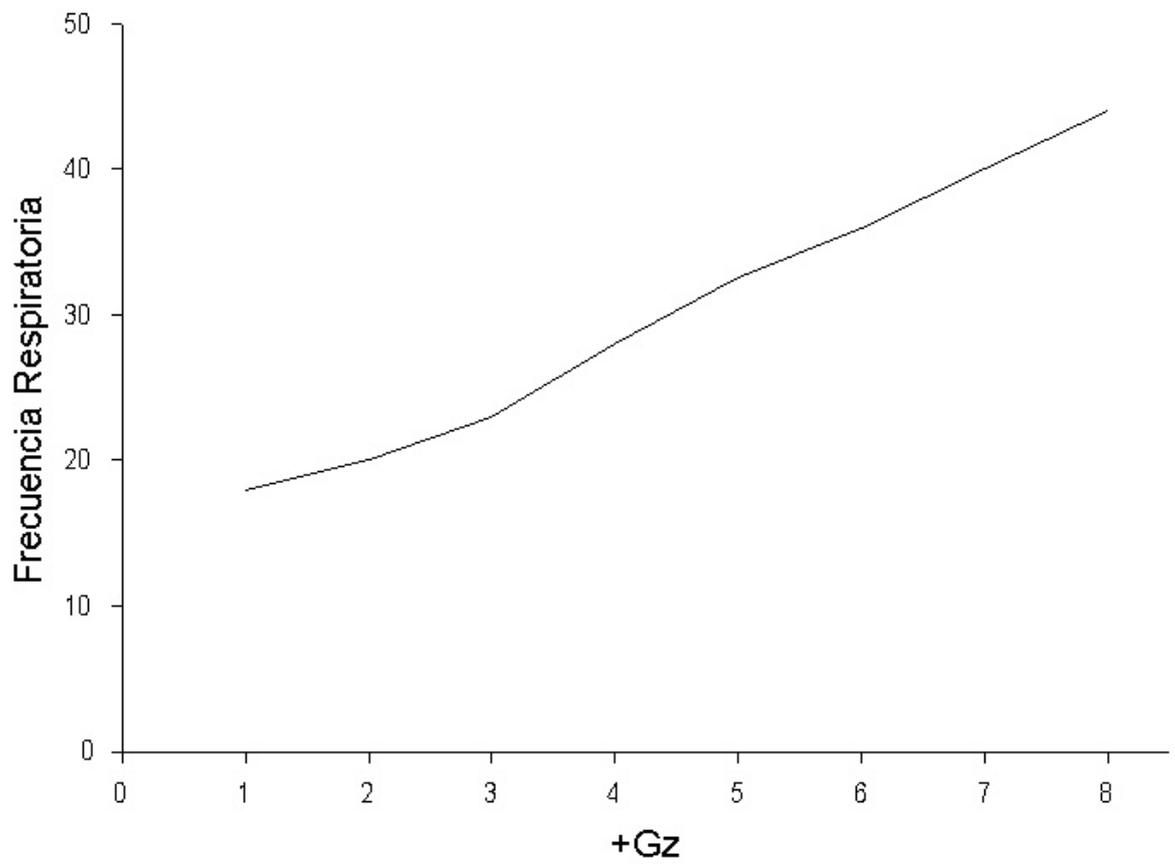
23. JA López, P. Vallejo, F. Rios, A. Bárcena, F. Alvarez sala, JL García Alcón. Revisión de la estabilización quirúrgica de la columna en pilotos de caza. *Medicina Aeroespacial y Ambiental*, 2001; 3: 107-113.
24. Newman, DG. +Gz-induced neck injuries in Royal Australian Air Force fighter pilots. *Aviat Space Environ Med.* 1997 ; 68: 520-524
25. Burton RR. Cervical intervertebral disc protrusion. *Aviat Space Environ Med.* 1997 Apr; 68(4): 354.
26. M. Petrén-Malmin, MD. Linder MD. Cervical spine degeneration in fighter pilots and controls: a 5-yr follow-up study. *Aviat Space Environ Med.* 2001; 72:443-6
27. Burton RR. Characterization of the resulting incapacitation following unexpected +Gz-induced loss of consciousness. *Aviat Space Environ Med.* 1987 Jul; 58(7): 631-6
28. Forster EM, Cammarota JP, Whinnery JE .G-LOC recovery with and without G-suit inflation. *Aviat Space Environ Med.* 1994 Mar; 65(3):249-53
29. Kawai Y, Puma SC. Cerebral blood flow velocity and cranial fluid volume decrease during +Gz acceleration. *J Gravit Physiol.* 1997 Oct; 4(3): 31-4
30. González Sistol A, Díez Chueca JL. Efectos visuales de las aceleraciones positivas simulados por ordenador. *Bioingeniería y Clínica- 4º trimestre 1986/8.*
31. González A, Rios F. Assesment of a physiological model of G stress in the opthalmic artery pressure. *Aviation Space and Environmental Medicine.* 1992 May; pág. 398
32. Yilmaz U, Cetinguc M, Akin A. Visual symptoms and G-LOC in the operational environment and during centrifuge training of Turkish jet pilots. *Aviat Space Environ Med.* 1999 Jul; 70(7):709-12
33. Pancratz DJ, Bomar JB. A new source for vestibular illusions in high agility aircraft. *Aviat Space Environ Med.* 1994 Dec; 65(12): 1130-3
34. Chelette TL, Martin EJ, Albery WB. The effect of head tilt on perception of self-orientation while in a greater than one G environment. *J Vestib Res.* 1995 Jan; 5(1):1-17.
35. F Rios, J Cantón, C Alonso, J del Valle, J salinas, C Velasco. Revisión del Síndrome Cinetósico en el medio aeronáutico.
36. Williams CA, Lina AR. Ejject of different body postures on the pressures generated during L-1 maneuver. *Aviat Space Environ Med.* 1988 Oct; 59(10): 920-7
37. Martin EE: Evaluation of the anti-G suit. Wright Field Memorandum Report No. TSEAA- 689-2B, November 20, 1947
38. Burton RR. Guidelines for a research and development program for high sustained G. *Physiologist.* 1993 Feb; 36:594-7.
39. Burns JW, Ivan DJ, Stern CH et al. Protection to +12 Gz. *Aviat Space Environ Med* 2001 May; 72(5):413-21
40. Albery WP. Acceleration Research News. 2001 May; News Vol 2, Issue 1
41. Geng XC, Zhan CL, Yan GD, et al. The protection against afforded by pressure breathing with different pressure schedules. *Space Med Med Eng (Beijing).* 2000 Jun; 13(3):166-70
42. ARJ Prior. Positive pressure breathing. In AGARD LS-202. Current concepts on G-protection, research and development. 1995;5-1,5-16.
43. Burton RR. Straining GOR tolerance determinations are a measure of G-duration not G-level tolerance. *SAFE J.* 1999 Mar; 29(1):12-5



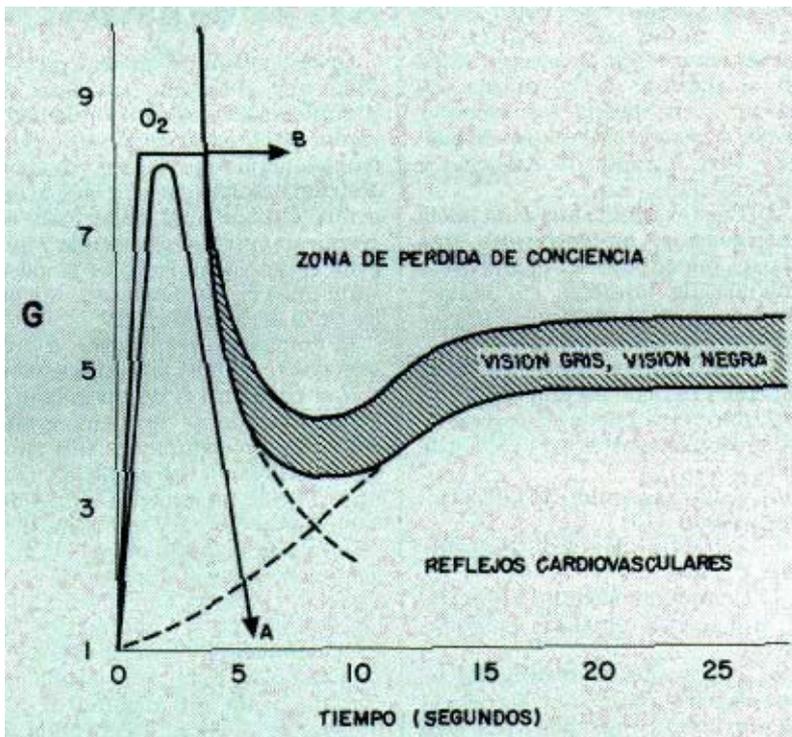
**Figura1.** Disminución del gasto cardíaco en función de la aceleración +Gz



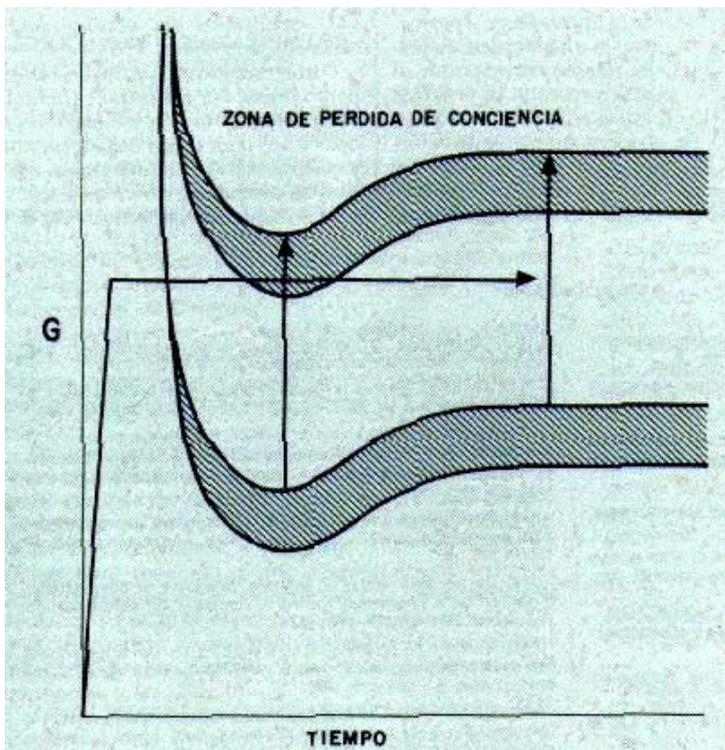
**Figura 2.** Relación entre la frecuencia cardíaca y la aceleración +Gz



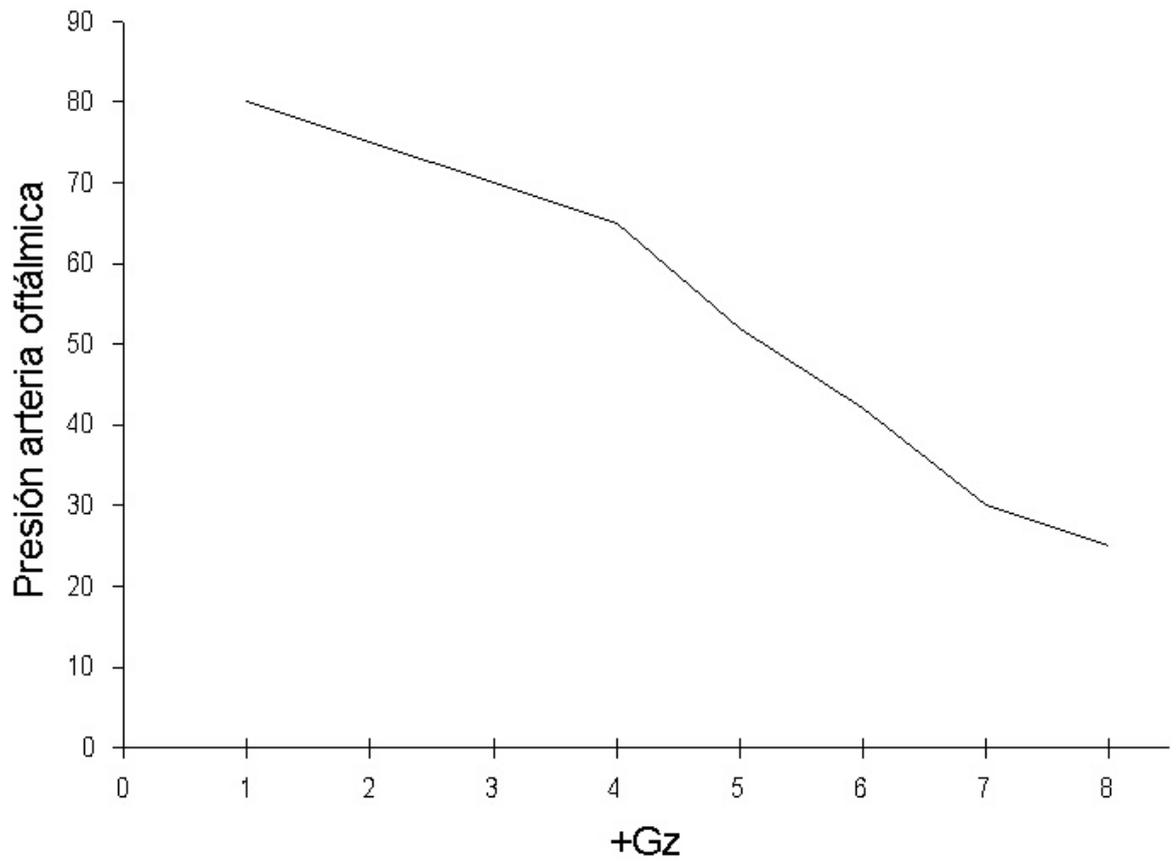
**Figura 3.** Relación entre la frecuencia respiratoria y la aceleración +Gz



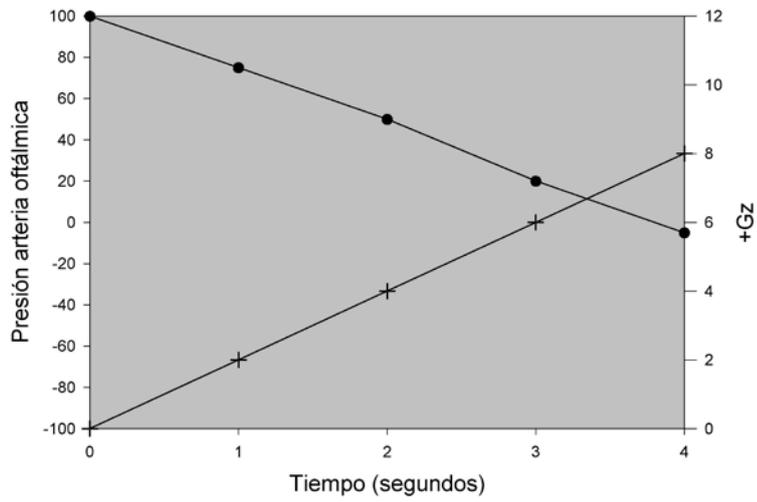
**Figura 4a.** Curvas de tolerancia a las aceleraciones +Gz



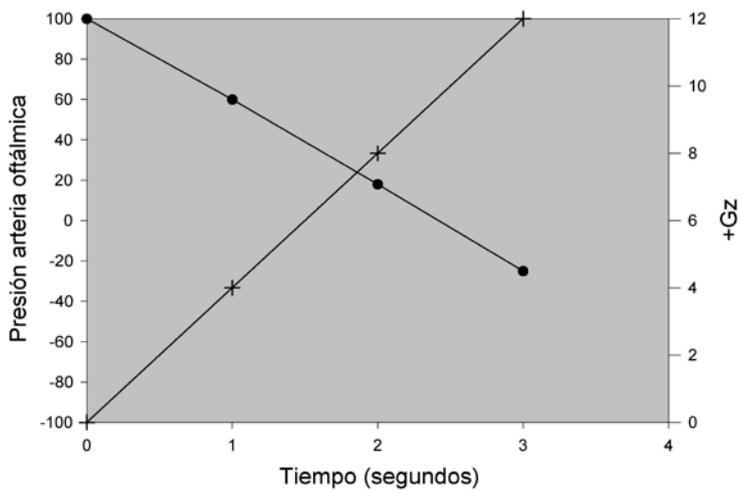
**Figura 4b.** Efecto de las maniobras respiratoria y muscular sobre la tolerancia a las aceleraciones



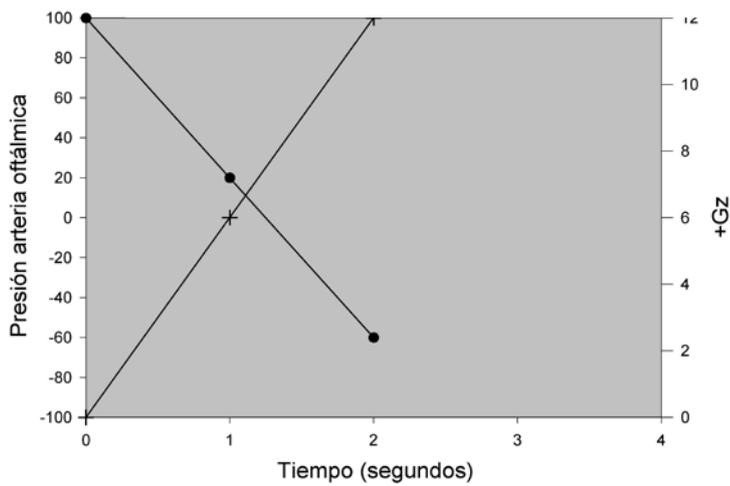
**Figura 5.** Disminución de la presión en la arteria oftálmica (mmHg) en función de la aceleración +Gz (datos originales de A. González Sistol et al <sup>30</sup>)



Velocidad de comienzo: 4 G/s



Velocidad de comienzo: 8 G/s



**Figura 6.** Variación de la presión en la arteria oftálmica (mmHg) y de la aceleración +Gz respecto al tiempo, para diferentes velocidades de comienzo (datos originales de A. González Sistol et al <sup>30</sup>)