

Atmósferas de los vehículos espaciales tripulados: condicionantes e implicaciones fisiológicas

ALFREDO ROSADO BARTOLOMÉ

DADO que cualquier ingenio espacial ha de desplazarse necesariamente a altitudes superiores al centenar de kilómetros, es obvio que los vehículos tripulados deberán poseer un sistema cerrado de suministro, renovación y acondicionamiento del aire respirable.

Al conjunto de dispositivos que cumplen esta misión se da el nombre de sistemas de sostenimiento vital. Entre sus funciones están, además de aportar a la atmósfera del vehículo el oxígeno necesario para compensar el consumo respiratorio y las pequeñas fugas que se produzcan, mantener el contenido de dióxido de carbono y otros contaminantes, así como la humedad y temperatura ambientales dentro de límites aceptables para la vida humana (1).

Sin embargo, las restricciones que la fisiología impone al ambiente de las naves pilotadas permiten, pese a todo, un cierto margen de elección.

Así pues, han de considerarse aspectos biomédicos y operacionales, así como requerimientos de ingeniería, en el diseño de la atmósfera cerrada de estos vehículos.

Debe tenerse presente que lo ideal sería mantener en todo momento una

atmósfera idéntica a la del nivel del mar (tabla I). No obstante, en determinados momentos o en compartimientos seleccionados pueden ser necesarias o deseables una presión y/o composición alternativas (2).

CONDICIONES DE CABINA EN LOS DISTINTOS PROGRAMAS TRIPULADOS

El aire que respiró durante su breve misión el primer astronauta de la historia, el soviético I.A. Gagarin en abril de 1961, era idéntico al del nivel del mar. Entre las muchas incertidumbres y precauciones que acompañaron a este vuelo, los ingenieros y médicos no quisieron que estuviese la exposición a una atmósfera inhabitual.

Unas condiciones similares se han mantenido hasta la fecha en todos los vehículos y laboratorios orbitales de la Unión soviética (3, 4 y 5).

Los cosmonautas soviéticos han dispuesto en todas sus misiones de parámetros ambientales próximos a los del nivel del mar, aunque con ciertas variaciones. La presión total ha variado entre 750-850 m.m.Hg, mientras que la presión parcial de oxígeno se ha situado en 160-250 m.m.Hg, dependiendo

de de la fase del vuelo. En el laboratorio orbital "Mir", actualmente en explotación, la presión barométrica puede ser regulada a voluntad entre 800 y 970 m.m.Hg.

Los estadounidenses, por el contrario, emplearon inicialmente unas condiciones de cabina peculiares. Las cápsulas de las series "Mercury" (1961-63), "Gemini" (1965-66) y "Apollo" (1968-72) -estas últimas usadas también en las misiones "Skylab" en 1973-74- disponían de oxígeno al 100% y 259 m.m.Hg (6,7). El empleo de estos parámetros obedecía, como motivo primario, al hecho de que una presión barométrica de una atmósfera (760 m.m.Hg) en el habitáculo requería una cápsula con unas paredes más resistentes y, por tanto, más pesadas. Así pues, para economizar peso al despegue, se optó por emplear un ambiente de baja presión.

De la crítica importancia del factor peso en aquel tiempo da idea la comparación de la masa en órbita del primer vehículo tripulado soviético, el "Vostok 1", con 4.725 Kg., frente a su homólogo norteamericano, la "Mercury MA-6" "Friendship 7", de 1.443 Kg. (8). Esta comparación, aunque ilustrativa, debe matizarse a la vista de las diferentes soluciones aplicadas a idénticos problemas técnicos por dos países con un nivel tecnológico muy distinto.

De cualquier modo, la Unión Soviética aprovechó su superioridad inicial en cuanto a cohetes portadores para dotar a sus vehículos tripulados de condiciones análogas a las del nivel del mar.

La circunstancia de que durante el programa "Mercury" no se realizasen Actividades Extravehiculares, que hu-

TABLA I
COMPOSICION PROMEDIO DE LA ATMOSFERA TERRESTRE AL NIVEL DEL MAR (1)

GAS	PORCENTAJE	PRESION PARCIAL (m.m.Hg)
Nitrógeno (N ₂)	78.62	597.0
Oxígeno (O ₂)	20.84	159.0
Vapor de agua (H ₂ O)	0.50	3.7
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.04	0.3
TOTAL	100	760



FIGURA 1.- La desnitrogenación preventiva de cierta forma de disbarismo era efectuada por las tripulaciones de las cápsulas "Gemini" y "Apollo" respirando oxígeno puro a una atmósfera de presión las tres horas y media previas al despegue. En la imagen, preparativos del lanzamiento de la primera dotación del laboratorio orbital estadounidense "Skylab" (1973). Foto cortesía NASA.

biesen podido justificar el uso de las condiciones descritas de baja presión, argumenta a favor de este razonamiento.

VALORACION DE LAS CONDICIONES DE HIPEROXIA HIPOBARICA

La utilización por los norteamericanos de una atmósfera compuesta de un solo gas presentaba ventajas e inconvenientes.

Entre las primeras estaba un control de la ingeniería más sencillo y el hacer innecesaria la práctica de la desnitrogenación durante el vuelo, al no existir riesgo de enfermedad descompresiva en la transición de la atmósfera de la cápsula (259 m.m.Hg, 100% O₂) a la escafandra (dotada de las series "Gemini" y "Apollo" de O₂ al 100% y 194 m.m.Hg) utilizada durante las salidas al exterior de los vehículos espaciales, popularmente conocidas como "paseos espaciales" y técnicamente denominadas Actividades Extravehiculares ("Extravehicular Activities", E.V.A.).

Como es lógico, previamente al despegue y antes de exponerse a la atmósfera de baja presión de la cápsula,

era imprescindible la desnitrogenación respirando oxígeno puro a 760 m.m.Hg durante tres horas y media (6) (figura 1).

En el caso de los astronautas soviéticos esta desnitrogenación era también necesaria y había de ser realizada en órbita, antes de llevar a cabo la sa-

lida introduciéndose en las escafandras provistas de una presión comprendida entre 269 y 300 m.m.Hg y 100% O₂ (9). Es decir, los cosmonautas rusos realizaban en vuelo la desnitrogenación que sus colegas americanos efectuaban antes del despegue.

Entre los inconvenientes de la atmósfera de oxígeno puro a baja presión estaba el que la comunicación verbal era más difícil y la transferencia de calor menos eficiente, circunstancia esta agravada por la ausencia de convección en condiciones de ingravidez, con lo que el enfriamiento de ciertos dispositivos se hacía más costoso.

Desde el punto de vista médico existía un cierto riesgo de atelectasia pulmonar por resorción (10). Es decir, que algunas regiones pulmonares, circunstancialmente obstruidas por secreción bronquial, pudiesen colapsarse y dejar de ser funcionantes. No hay constancia de que este trastorno ocurriese en grado tal como para afectar la capacidad de trabajo o la salud de los astronautas.

Otra desventaja del ambiente de oxígeno puro era un mayor riesgo de incendio, riesgo que se confirmó en enero de 1967 con el incendio de la cápsula "Apollo 204", situada en tierra y en la que realizaban pruebas tres astronautas, quienes perecieron víctimas de la asfixia y las quemaduras, a causa



FIGURA 2.- Tripulación de la misión "Skylab 2" poco antes de iniciar el vuelo. (foto cortesía NASA).

de la rápida combustión, favorecida por el oxígeno puro e iniciada por un cortocircuito.

Para reducir en lo sucesivo la posibilidad de accidentes similares se modificaron las escafandras y la cápsula, manteniendo sin embargo en todos los vehículos "Apollo" la atmósfera de oxígeno al 100% y 259 m.m.Hg durante el vuelo. De esta forma se podía seguir efectuando las "E.V.A." sin desnitrógenación durante el vuelo. No obstante, durante los preparativos del lanzamiento, el ambiente de la cápsula se componía de una mezcla de gases menos inflamable, con un 64% de oxígeno y un 36% de nitrógeno a una presión de 760 m.m.Hg.

Tras el despegue se utilizaba un proceso controlado de mezcla y evacuación simultánea de gases mediante el que el nitrógeno era eliminado a través de la válvula utilizada para eliminar la orina al exterior de la cápsula, de forma que el contenido en oxígeno de la atmósfera de la astronave aumentaba hasta superar el 90% el tercer día de vuelo, con una presión final de 259 m.m.Hg de O_2 al 100%.

A pesar de que durante esa fase crítica de la misión la atmósfera del vehículo era mezcla de oxígeno y nitrógeno, los astronautas apenas si respiraban este último gas, pues tanto antes de la entrada en la cápsula como du-

ambiente de oxígeno puro a 760 m.m.Hg. Solo tras la inserción en órbita los astronautas desconectaban sus trajes de presión, respirando la atmósfera de la cabina, en la que ya entonces se había iniciado la eliminación del nitrógeno por el método descrito.

Una ventaja adicional de este procedimiento era que durante el lanzamiento y la reentrada se encontraban los tripulantes en el interior de sus escafandras (figura 3), que les habrían permitido sobrevivir aunque la atmósfera de la cabina sufriese una pérdida de presión accidental. Debe tenerse presente que es durante esas fases del vuelo cuando más posibilidades de fallo existen en el sistema de acondicionamiento de presión del vehículo, al estar sometido a las más intensas aceleraciones (7.2 G en los lanzamientos de la serie "Gemini" y 6.7 G al regreso de los vuelos lunares "Apollo").

En la totalidad de las misiones tripuladas estadounidenses, tanto circunrrestres como lunares, la presión parcial de oxígeno respirable no fue nunca inferior a su valor al nivel del mar (tabla I), sino por el contrario siempre superior.

Esta circunstancia resultó no estar exenta de inconvenientes. Al finalizar los programas "Gemini" y "Apollo" se puso de manifiesto cierto grado de anemia en las tripulaciones (11), ex-

pérdidas obedecía a hemólisis (destrucción de hematíes) y/o a depresión de la capacidad regeneradora de eritrocitos por la médula ósea roja. La causa de ambos procesos residía en última instancia en las condiciones de hiperoxia a que se sometían los astronautas en la atmósfera de oxígeno puro a 259 m.m.Hg.

Se llegó a esta conclusión basándose tanto en análisis hematológicos de los astronautas realizados tras el regreso (913) como en simulaciones en tierra de las condiciones de hiperoxia (14).

Así pues, tras la terminación del programa "Gemini" en 1966 un comité de asesoramiento aconsejó el uso en la atmósfera de los vehículos espaciales tripulados americanos de una mezcla de nitrógeno y oxígeno, con una proporción de este último de 60-70% (presión parcial de 150-185 m.m.Hg) y conservando una presión total de 260 m.m.Hg (11).

Pese a estas recomendaciones, durante las misiones "Apollo" (1968-72) se mantuvieron las mismas condiciones de vuelos anteriores. Tales directrices se aplicaron por vez primera en 1973 al laboratorio orbital "Skylab" (15) (tabla II), cuyas tripulaciones habrían de permanecer en órbita entre uno y tres meses.

Sin embargo, las alteraciones hematológicas descritas siguieron produciéndose (11). Incluso en los actuales vuelos de los Transbordadores Espaciales ("Space Shuttle") norteamericanos, iniciados en 1981 y en los que se dispone de una atmósfera idéntica a la del nivel del mar, se han descrito cambios semejantes (16). Parecidos resultados se han encontrado en los cosmonautas soviéticos, pese a haber dispuesto siempre de estas mismas condiciones (17).

Las evidencias acumuladas llevan a atribuir las alteraciones mencionadas a otros factores que no procede exponer aquí, sin por ello dejar de señalar la contribución que en su día tuvieron las condiciones de hiperoxia hipobárica.

Entre tales factores el más relevante parece ser la microgravedad asociada a los vuelos espaciales. A pesar del tiempo transcurrido desde los primeros hallazgos, las causas de este trastorno hematológico siguen siendo ac-

TABLA II
COMPOSICION PROMEDIO DE LA ATMOSFERA DEL LABORATORIO ORBITAL "SKYLAB" (15)

GAS	PORCENTAJE	PRESION PARCIAL (m.m.Hg)
Oxígeno (O_2)	65.40	170
Nitrógeno (N_2)	28.90	75
Vapor de agua (H_2O)	3.90	10
Dióxido de carbono (CO_2)	1.80	5
TOTAL	100	260

rante la misma (figura 2) y una vez en su interior se encontraban dentro de escafandras a las que se proveía de oxígeno puro procedente de un dispositivo autónomo o bien del sistema de sostenimiento vital del vehículo una vez en su interior. Como quedó dicho, durante las tres horas y media previas al despegue los tripulantes habían respirado dentro de sus escafandras un

presada analíticamente como una reducción en un 10-15% de la masa eritrocitaria (12).

Aunque este trastorno era esencialmente un hallazgo de laboratorio, y por tanto no causaba alteración detectable alguna que interfiriese con las actividades del vuelo, fue objeto de cuidadosos estudios. Como resultado de los mismos, se determinó que estas



FIGURA 3.- Interior del Módulo de Mando y Servicio "Apollo" tal y como aparecía antes del despegue y durante el regreso a través de la atmósfera. Los tripulantes permanecen aislados de la atmósfera del vehículo en el interior de sus trajes de presión. (fuente: "Historia de la Astronáutica", Riego Ediciones S.A., Madrid, 1980, Vol. I, pag. 66).

tualmente objeto de investigación (12, 16).

VUELO CONJUNTO "APOLLO-SOYUZ"

En julio de 1975 se efectuó el hasta ahora único vuelo espacial conjunto soviético-norteamericano (programa A.S.T.P., "Apollo Soyuz Test Project"), durante el cual se llevó a cabo

el ensamblaje en órbita de un vehículo estadounidense "Apollo" con otro soviético "Solluz" y el intercambio de tripulaciones mientras duró el acoplamiento.

El vehículo americano disponía de la conocida atmósfera de oxígeno puro a 259 m.m.Hg. Si el ingenio espacial soviético hubiese ido provisto de sus condiciones atmosféricas habituales (equivalentes a las del nivel del

mar) el transbordo de los cosmonautas soviéticos al interior de la cápsula americana habría requerido una desnitrogenación previa de varias horas de duración. Para reducirla a tan solo 25 minutos, se redujo la presión de la atmósfera del "Soyuz" a 523 m.m.Hg, con unas proporciones del 31% de oxígeno y del 69% de nitrógeno, obteniendo así una presión parcial de oxígeno de 162 m.m.Hg (18).

Con el fin de comprobar que el traslado de los tripulantes desde el ambiente de alta presión al de baja no ocasionaría ninguna manifestación de disbarismo se procedió a simular esas condiciones en cámaras de baja presión.

En el transcurso de 11 pruebas distribuidas en tres periodos de 24 horas, y en las que participaron siete sujetos, no se puso de manifiesto trastorno alguno, tanto en las pruebas analíticas como en la apreciación subjetiva de síntomas (19).

Si, tan como parece probable, en un futuro se establecen sistemas de cita y acoplamiento compatibles entre vehículos tripulados de diferentes nacionalidades no resultará necesario efectuar modificaciones como la descrita, pues tanto los ingenios espaciales hoy en uso como aquéllos en desarrollo han de disponer de condiciones de cabina análogas a las del nivel del mar en todos los casos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Velasco Díaz C., Alonso Rodríguez C., del Valle Garrido J.B. "Hipoxia del aviador", *Jano*, 24 Oct.-4 Nov. 1985; XXIX (663): 1.131-1.140.
- 2.- Waligora J.M. "The physiological basis for spacecraft environmental limits", NASA Reference Publication 1.045. Houston, Texas, November 1979.
- 3.- Mandrowsky B.N. "Soyuz 9 flight, a manned biomedical mission", *Aerospace Medicine*, 1971; 42 (2): 172-176.
- 4.- Parin V.V., Kosmolinsky F. "Soviet research in space medicine", *Aerospace Medicine*, 1971, 42(3): 339-340.
- 5.- "Missions scientifique et technique a bord de la station spatiale MIR". Dossier d'Information Document B. Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, 1987.
- 6.- Mills F.J., Harding R.M. "Special forms of flight. IV: Manned spacecraft", *British Medical Journal*, 1983; 287: 478-482.
- 7.- Berry C.A. "Medical legacy of Apollo", *Aerospace Medicine*, 1974; 45 (9): 1.046-1.057.
- 8.- Silvestri G. y otros. "El gran libro de la astronáutica", 1ª edición, Barcelona. Ediciones HYMSA, 1987.
- 9.- Mason J.A., Johnson P.C. "Space station medical sciences concepts", NASA Technical Memorandum 58255. Houston, Texas, February 1984.
- 10.- Brobeck J.R. y otros. "Bases fisiológicas de la práctica médica", 10ª Edición. Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana, 1982. Publicado originalmente bajo el título "Best & Taylor physiological basis of medical practice", Baltimore/London, William&Wilkins Co., 1981.
- 11.- Tavassoli M. "Anemia of spaceflight", *Blood*, 1982; 60 (5): 1059-1067.
- 12.- Talbot J.M., Fisher K.D. "Influence of spaceflight on red blood cells", *Federation Proc.*, 1986; 45:2. 285-2.290.
- 13.- Fischer, C.L., Johnson P.C., Berry C.A. "Red blood cell mass and plasma volume changes in manned spaceflight", *J.A.M.A.*, 1967; 200 (7): 579-583.
- 14.- Larkin E.C., Adams J.D., Williams, W.T., Duncan D.M. "Hematologic response to hypobaric hyperoxia", *American Journal of Physiology*, 1972; 223: 431.
- 15.- Sawin, C.F., Nicogossian, A.E., Rummel J.A., Michel E.L. "Pulmonary function evaluation during the Skylab and Apollo-Soyuz mission", *Aviat. Space Environ. Med.*, 1976; 47 (2): 168-172.
- 16.- Leach C.S., Johnson P.C. "Influence of spaceflight on erythrokinetics in man", *Science*, 1984; 225 (4658): 216-218.
- 17.- Vorobyov E.I., Gzenko O.G., Genin A.M., Egorov A.D. "Medical results of Salyut-6 manned space flights", *Aviat. Space Environ. Med.*, 1983. Supp. 1, 54 (12): S31-S40.
- 18.- Vann R.D., Torre-Bueno J.R. "A theoretical method for selecting spacecraft and space suit atmospheres", *Aviat. Space Environ. Med.*, 1984; 55: 1.097-1.102.
- 19.- Cooke, J.P. et al. "Prevention of decompression sickness during a simulated space docking mission", *Aviat. Space Environ. Med.*, 1975; 46 (7): 930-933.