

Patología ambiental en hipobaría y en hiperbaría. Diferencias y similitudes

Jordi Desola

Especialista en Medicina de la Educación Física y el Deporte, Medicina Interna y Medicina del Trabajo.

CRIS-UTH. Unitat de Terapèutica Hiperbàrica. Hospital "Dos de maig". Barcelona.

Instructor de buceo. Piloto de aviación general.

Disbarismos

Las alteraciones descompresivas propias del buceo con escafandra suelen ser más o menos conocidas por el público en general. Mucho menos lo es que la patología disbárica afecta también a aviadores y astronautas¹. Y si en alguna ocasión se tiene conocimiento de la posibilidad de accidentes descompresivos en otras profesiones que se someten de forma accidental o programada a cambios de la presión ambiental, la opinión más habitual suele ser que el mecanismo es opuesto al del buceo con escafandra.

Como se ha expuesto en las páginas anteriores, esta afirmación es inexacta. En uno y otro caso, tanto en las actividades subacuáticas como en astronáutica o aviación, los accidentes disbáricos descompresivos se producen como resultado de la disminución de la presión ambiental sin haber adoptado medidas de precaución adecuadas. Se presta a confusión referirse a los accidentes descompresivos como propios del "ascenso" o del "descenso", sino que con mayor rigor deberíamos abordarlos como accidentes propios de la disminución de presión, es decir, que ocurren durante la fase de descompresión o bien del aumento de la presión exterior propio de la fase de presurización. Este mecanismo es idéntico en la astronáutica, en la aviación o en el buceo. John Scott Haldane afirmaba que "el buceo es un espectáculo que se paga en la salida". Los buceadores experimentan la disminución ambiental durante el retorno a la superficie, es decir, en la segunda fase de la inmersión, mientras que los aviadores experimentan esos fenómenos al inicio de su actividad, los cuales tienden a normalizarse en el retorno. Ésas son las únicas diferencias, pero el mecanismo fisiopatológico es el mismo.

Un buceador adecuadamente equipado y bien entrenado puede descender a gran profundidad sin problemas, y su actuación sólo está limitada por los cambios volumétricos, es decir, los que afectan al volumen de los gases que, como sabemos, disminuye al aumentar la presión². Pero la permanencia bajo presión no provoca ningún tipo de problemas mientras se mantenga una cota estable. Cuando inicia la emersión, en ese momento aparecen los trastornos descompresivos cuya magnitud y envergadura están en función de la profundidad máxima alcanzada y del tiempo de estancia en el fondo³. En la tecnología del buceo a gran profundidad —el llamado *buceo a saturación*— los buzos permanecen presurizados en cámara hiperbárica a la presión equivalente del lugar de trabajo durante días o semanas, e inician la descompresión al final de ese período asumiendo que su organismo ha solubilizado la cantidad máxima posible de gas inerte, requiriendo en consecuencia una *descompresión de saturación*. Esto añade un nuevo factor de riesgo y empeora el pronóstico de un accidente descompresivo de mayor envergadura, cuyo embolismo gaseoso se ha desencadenado a partir del estado de saturación total de su organismo.

El aviador, en cambio, experimenta una disminución significativa de la presión ambiental desde el momento en que inicia el ascenso, es decir, desde el principio de la actividad aeronáutica. Normalmente, la cabina de las modernas aeronaves comerciales o militares se presuriza mediante aire comprimido a un valor cercano, pero siempre inferior, a la presión atmosférica (fig. 1). Desde este punto de vista, es fácil comprender que las variaciones de presión en un vuelo, ya sea espacial o comercial, no deben tener tanta envergadura. El buceo implica unos cambios de presión cuantitativamente mucho mayores que cualquier incursión aérea, pero, en cambio, hay un factor cualitativo muy importante: el aviador y el astronauta inician siempre su actividad hipobárica a partir de un valor estable de saturación, lo cual en el buceo sólo ocurre en inmersiones muy prolongadas. Ésta es la razón por la cual la patología descompresiva en hipobaría puede causar trastornos que no se observarían en la práctica del buceo con escafandra después de alteraciones descompresivas cuantitativamente más importantes⁴.

No obstante, la posibilidad de un accidente disbárico en aviadores estará siempre ligada a una despresurización accidentada de la cabina, pues los procedimientos de compresión y descompresión habituales nunca alcanzan niveles críticos que puedan dar lugar a

Figura 1. Avión F-18 del ejército español efectuando maniobras de demostración sobre el aeropuerto de Sabadell. Obsérvese el halo de condensación a ambos lados de la cabina.



Cortesía de Josep Tomàs, Aeroclub Barcelona-Sabadell, ACBS.

patología descompresiva aguda. Esta posibilidad no es frecuente, pero tampoco puede calificarse como excepcional⁵. Los medios de comunicación a menudo informan de accidentes de este tipo, los cuales han sido reproducidos en muchas películas sobre catástrofes aéreas, que tan de moda estuvieron hace unos años. En ellas se observaba cómo la salida del aire a través de un orificio accidental, o por pérdida de una compuerta de un avión comercial, provocaba la expulsión de todos los objetos del interior de la cabina, pero pocas veces se describían en estas filmaciones accidentes disbáricos en el pasaje o personal de vuelo. No sabemos si por descuido o más probablemente por ignorancia de los guionistas.

En los astronautas, las diferencias de presión son más acentuadas, puesto que la aeronave se encuentra en estado de microgravedad y de ausencia absoluta de presión exterior. Pero la nave nodriza está presurizada a un valor cercano, aunque siempre inferior, a la presión atmosférica. Los astronautas se someten a un elevado riesgo descompresivo al inicio de las actividades extravehiculares, los popularmente llamados “paseos espaciales” (fig. 2). El astronauta ocupa entonces un microhábitat diseñado específicamente para su actividad, el cual recrea unas condiciones de presión, temperatura, comunicación y confort aceptables. Se trata del traje espacial que, por razones de diseño y de ergonomía, mantiene siempre un valor de presión inferior a la nave nodriza. Por esta razón, el astronauta sufre una disminución significativa de la presión ambiental cuando ocupa el traje espacial, y está sometido, a todos los efectos, a los imperativos de la patología disbárica descompresiva⁶. Las noticias sobre accidentes disbáricos en astronautas han sido conocidas con muchos años de retraso, pues estos accidentes forman parte del secreto implícito a agencias tan tecnificadas. No obstante, no se

han notificado alteraciones disbáricas en astronautas de la agencia espacial norteamericana (NASA) durante operaciones reales, lo cual contrasta con la observación de incidentes durante los entrenamientos en cámaras hipobáricas. Esta mayor prevalencia de disbarismo en actividades hipobáricas terrestres es objeto de atención especializada, por lo que las agencias espaciales han consultado en algunas ocasiones a quienes más experiencia tienen en accidentes descompresivos: los grandes especialistas en actividades subacuáticas. Aparte de la posible influencia de la microgravedad y la aceleración en la formación y desarrollo de burbujas microembolígenas, se ha llegado a sospechar que tal vez algunos astronautas podrían haber experimentado trastornos descompresivos leves sin haberlo comunicado, puesto que saben muy bien que ello podría significar el fin de su carrera espacial (fig. 3).

En la aviación deportiva, los monomotores o incluso bimotores utilizados normalmente por los aviadores deportivos no poseen casi nunca cabinas presurizadas, y la permanencia del aviador está condicionada a sus límites de tolerancia hipóxica¹. Por otra parte, la limitada potencia de estas aeronaves (fig. 4) no hace fácil el ascenso a grandes altitudes y, en todo caso, se requiere un tiempo considerable para alcanzar dichas cotas, por lo cual el riesgo descompresivo es nulo. En estos casos, la hipoxia es el fac-

Figura 2. Astronautas de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) durante una actividad extravehicular (EVA).



Fotografía original de la NASA.

Figura 3. Cámara hiperbárica ubicada en el Johnson Space Center, en Houston, Texas, Estados Unidos.



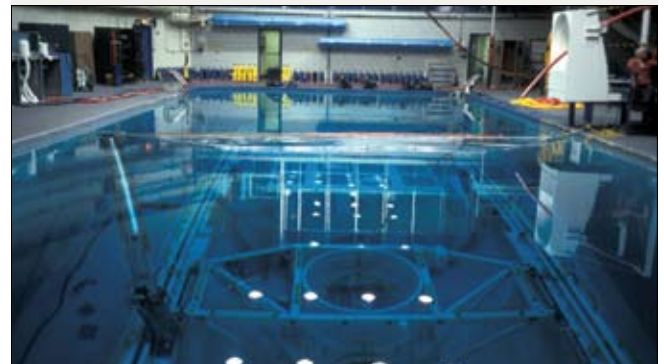
Fotografía de Jordi Desola.

Figura 4. Avión monomotor de 2 plazas Cessna-152, muy popular para iniciación en aviación deportiva.



Cortesía de Josep Tomàs, Aeroclub Barcelona-Sabadell, ACBS..

Figura 5. Piscina del laboratorio de simulación de microgravedad de la NASA, del Johnson Space Center, en Houston, Texas, Estados Unidos. Obsérvese la reproducción de la bodega de una lanzadera espacial en el fondo de la piscina, una compuerta de aeronave, equipos de buceo autónomo y un astronauta equipándose el traje espacial en los bordes de la piscina.



tor determinante, que puede ser causa de alteraciones inadvertidas por el piloto en detrimento de su destreza y de su capacidad de reconocimiento y reacción frente a situaciones de peligro.

La aparición de un accidente disbárico depende siempre, como sabemos, de la superación de un punto crítico de sobresaturación, a partir del cual los gases inertes cambian de estado, forman burbujas y causan un fenómeno de polimicroembolismo gaseoso. En tales circunstancias, toda disminución de la presión ambiental en los minutos y horas que siguen a una actividad en hiperbaria podrá sobrepasar el punto crítico de sobresaturación a pesar de que se haya seguido un procedimiento correcto de descompresión. Dicho de otro modo, el buceador que ha realizado una inmersión, aunque sea a profundidad importante, pero que ha seguido un procedimiento descompresivo correcto, no sufrirá ningún síntoma disbárico. Pero si durante el llamado “período de nitrógeno residual” se somete a una disminución de la presión ambiental, ascendiendo a una montaña o volando en una aeronave no presurizada, en esos casos el buceador puede desarrollar un accidente disbárico durante la estancia en hipopresión.

Los accidentes disbáricos en aeronaves comerciales eran, hasta hace poco, excepcionales. Pero en la actualidad, esto ha cambiado debido a la cada vez más frecuente costumbre de viajar a zonas lejanas de alto atractivo turístico por la calidad de sus inmersiones, como el Mar rojo, la Polinesia, el Caribe u otras zonas. Con el fin de obtener el máximo provecho de sus vacaciones, los buceadores a menudo realizan 2, 3 e incluso 4 inmersiones diarias durante 4 o 5 días consecutivos. Y a veces toman el avión de regreso al cabo de escasas horas después de la última inmersión. Todos los buceadores han sido instruidos en los cursillos de buceo acerca de la necesidad de esperar unas horas hasta tomar un avión después de la última inmersión, y los modernos descompresímetros digitales facilitan esta información de forma clara. Pero no es infrecuente que los buceadores no tengan en cuenta estas advertencias y desarrollen trastornos descompresivos durante los prolongados vuelos transoceánicos, y que consulten a los centros de medicina hiperbárica en sus lugares de residencia al regreso. Muchas líneas aéreas prohíben de forma explícita a sus pilotos la práctica del buceo con escafandra. Por el contrario, los aviadores militares de algunos países reciben entrenamiento en actividades subacuáticas. En tales casos, los intervalos entre vuelo y actividad subacuática están bien estipulados en sus programas de formación.

El entrenamiento de los astronautas incluye largas incursiones subacuáticas, pero esto no se debe a la necesidad de dominar estas técnicas, aunque no son incompatibles, sino a que el buceo implica una forma óptima de entrenamiento para actividades en estado de microgravedad. Si bien hay simuladores de vuelo y de navegación aérea y espacial con un realismo asombroso, la tecnología terrestre no ha desarrollado todavía un sistema de simulación microgravitacional, y estamos muy lejos de lo que a menudo vemos en las películas de ciencia-ficción, donde las aeronaves disponen de dispositivos automáticos de gravedad positiva¹. En ausencia de estos mecanismos, los astronautas entrenan sus paseos espaciales en los “laboratorios de simulación de gravedad 0”, durante prolongadas estancias en piscinas especiales en las cuales se reproduce con realismo la bodega de las lanzaderas espaciales sumergidas, donde repiten una y otra vez, dentro de un traje espacial completo y en tiempo real, las maniobras que deberán hacer en el espacio en su actividad extravehicular real (fig 5).

Por tanto, llegamos a la conclusión de que los accidentes disbáricos que presentan astronautas, aviadores o buceadores, no obedecen a mecanismos distintos sino que se producen en fases

cronológicamente diferentes pero obedeciendo a los mismos mecanismos fisiopatológicos. Son las condiciones ambientales técnicas y climáticas del entorno las que condicionan en gran medida la actividad en sí misma, y en su caso modifican su forma de presentación.

Actividades en hipo/hiperbaria: inmersiones en lagos de alta montaña

Algunas actividades subacuáticas especiales combinan varias de las modificaciones ambientales hipobáricas e hiperbáricas cuyos condicionamientos fisiológicos se superponen. La inmersión en lagos de alta montaña es una actividad sofisticada y de cierta complejidad, que hasta hace poco podía considerarse excepcional y limitada a complejas estructuras profesionales o militares. Desde hace unos años, algunas organizaciones ofrecen las inmersiones en altitud dentro de un entorno ciertamente complejo, pero asequible a cualquier buceador entrenado⁷.

Ya sabemos que la presión absoluta es la suma de las presiones relativa y atmosférica. Es decir, según el principio fundamental de la presión hidrostática, la presión de una columna de agua de 10 m es igual a la presión atmosférica. O, dicho de otro modo, la presión de una columna de agua aumenta en un valor equivalente a la presión atmosférica cada 10 m de profundidad. Por esta razón, un buceador que está realizando una inmersión a, por ejemplo, 12 m de profundidad, está sometido a la presión de la columna de agua que tiene encima (1,2 atm), más el peso del aire atmosférico; es decir, soporta una presión total de 2,2 atmósferas absolutas (ata), un buceador a 20 m de profundidad soporta 3 ata, y a 30 m 4 ata. Pero estos cálculos se han realizado a nivel del mar, o sea, entendiéndose que la presión atmosférica tiene un valor de 1 kg/cm² o 101 Pascal (Pa), o 1 ata.

Si la inmersión se inicia en un punto de altitud elevada, sobre el nivel del mar, como es propio de los lagos de alta montaña, la presión atmosférica, como sabemos, tiene un valor proporcionalmente más bajo. Si el buceador realiza allí una inmersión normal a, por ejemplo, 12 m la presión absoluta se calcula de la misma forma, pero el valor resultante será menor que la presión absoluta que correspondería a la inmersión en el mar a la misma profundidad.

La técnica de inmersión en alta montaña es complicada, especialmente por las dificultades de acceso y por el peso del equipo que el buceador debe transportar si no dispone de sistemas espe-

Figura 6. Preparación de una inmersión en lagos de montaña a 2.400 m de altitud. El pesado y aparatoso equipo de buceo ha sido transportado por un helicóptero de la organización.



Cortesía de Raúl Baró, Diving Andorra, Principado de Andorra.

Tabla I. Cálculo de profundidades equivalentes para inmersión con escafandra en ambiente hipobárico										
Profundidad de la inmersión (metros columna de agua)	Altitud de la superficie del lago o del hábitat (metros sobre nivel del mar)									
	300	600	800	1.200	1.500	1.800	2.100	2.400	2.700	3.000
Profundidad equivalente (metros a nivel del mar)										
3	3	3	30	4	4	4	4	4	4	5
6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9
9	9	10	10	11	11	11	12	12	13	13
12	12	13	14	14	15	15	16	16	17	18
15	16	16	17	18	18	19	20	20	21	22
18	19	19	20	21	22	23	24	25	26	27
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35
27	28	30	31	32	33	34	35	37	38	40
30	31	33	34	35	37	38	40	41	43	44
34	35	36	37	39	40	42	43	45	47	49
37	38	39	41	42	44	45	47	49	51	53
40	41	43	44	46	48	49	51	53	55	58
43	44	46	48	50	51	53	55	57	59	62
46	47	49	51	53	55	57	59	62	64	66
49	51	52	54	56	59	61	63	66	68	71
52	54	55	58	60	62	65	67	69	72	75
55	57	59	61	63	66	68	71	74	76	80
58	60	62	65	67	69	72	75	78	81	84
61	63	66	68	70	73	76	79	82	85	88
64	66	69	71	74	77	80	83	86	89	93
67	69	72	75	77	80	84	87	90	94	97
70	73	75	78	81	84	87	91	94	99	102
73	76	79	81	84	88	91	94	98	102	106
76	79	82	85	88	91	95	98	102	106	111

Profundidad de la parada de descompresión según tabla (a nivel del mar)	Profundidad de la parada de descompresión en altitud (metros de columna de agua)									
	3	3	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2	2
6	6	6	5,5	5	5	5	4,5	4,5	4	4
9	9	8,5	8	8	7,5	7,5	7	6,5	6,5	6,5
12	12	11	11	10,5	10	10	9,5	9	9	8,5

Modificada por el autor a partir del NOAA Diving Manual.

ciales de transporte (fig. 6). Sin embargo, la actividad acuática se realiza con aparente normalidad, pero su organismo está experimentando los efectos de una presión equivalente superior a la

que indican sus instrumentos convencionales. El buceador debe haber consultado previamente las tablas de cálculo de altitudes equivalentes, que permiten determinar la presión real que su orga-

nismo estará soportando, la cual será superior a la que le indica su profundímetro, que está calibrado para inmersiones en el mar. Por las mismas razones, si la inmersión es larga y profunda y requiere paradas de descompresión, éstas deberán realizarse a una profundidad también diferente. El buceador deberá consultar las tablas de altitud equivalente (o tablas de buceo en altitud), aplicar la conversión adecuada, y consultar la duración de las paradas en una tabla de descompresión convencional, pero realizando dichas paradas a la profundidad equivalente, que será siempre menor que la que correspondería en el mar (tabla I).

Siguiendo el ejemplo anterior, un buceador que realiza una inmersión a 12 m en un lago de alta montaña, cuya altitud a nivel de la superficie del agua es de 2.400 m sobre el nivel del mar, deberá consultar la tabla de buceo en altitud y comprobar que la profundidad equivalente a nivel del mar sería de 16 m en el mar. Si la inmersión se realizase a 18 m, la profundidad equivalente sería de 25 m. Si el perfil de la inmersión requiere paradas de descompresión a 3 m, a dicha altitud éstas deberán realizarse a 2 m. Si fuese necesaria una parada a 6 m, en ese lago debería realizarse en realidad a 4,5 m.

En la actualidad, los modernos descompresímetros digitales, conocidos popularmente como “ordenadores de buceo”, realizan estos cálculos de forma automática. Pero el buceador no debe olvidar que toda estimación descompresiva realizada por dichos dispositivos se basa en un cálculo matemático que asume unas condiciones fisiológicas óptimas que pueden no coincidir con su perfil fisiológico y anatómico. La prudencia consistirá siempre en aplicar factores de corrección en función de su edad, perfil antropométrico y otras variaciones individuales que cada buceador debe conocer.

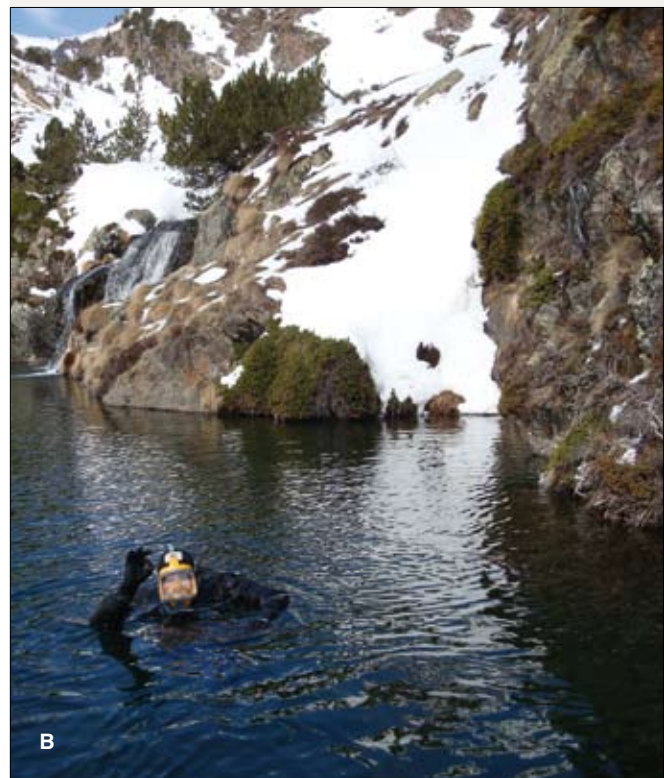
Las inmersiones en lagos de alta montaña no solamente implican variaciones importantes de presión⁸. Es obvio que la temperatura ambiental en la montaña será siempre inferior a la del nivel del mar, lo cual aumenta el riesgo descompresivo y de hipotermia, limita el tiempo de permanencia en el agua, pero añade un atractivo especial. Las inmersiones en los lagos de alta montaña en invierno han dejado de ser excepcionales, y la posibilidad de bucear después de una jornada de esquí está hoy día al alcance en varios lugares de la península ibérica, sobre todo en el Pirineo aragonés, catalán y andorrano (fig. 7).

Otro factor ambiental todavía más limitante es la posibilidad de que la inmersión se realice por debajo del hielo que cubre los lagos de alta montaña (fig. 8). No cabe duda de que se trataría de una actividad de alto riesgo si no se realizara contando con medios especiales de orientación y rescate, pero las empresas que se dedican a esta actividad resuelven satisfactoriamente estos problemas y, de hecho, convierten la inmersión bajo hielo en una actividad de una subyugante belleza que establece un reto para buceadores deportivos expertos. Unos y otros deben recordar en estos casos que las variaciones de presión ambiental pueden modificar los algoritmos descompresivos, y sin la menor duda el frío es un factor de riesgo añadido para desarrollar accidentes disbáricos³.

En otras condiciones menos frecuentes pero perfectamente posibles, cuando las inmersiones se realizan en lagos o en aguas interiores de países extremadamente fríos, las variaciones de presión ambiental pueden ser menores o incluso insignificantes, pero la temperatura del agua añade un factor condicionante que obliga a adoptar precauciones especiales y sistemas sofisticados de supervivencia (fig. 9). En el extremo de estas situaciones, el buceo en aguas polares añade además la posibilidad de fenómenos magnéticos inesperados, lo cual es objeto de estudio en algunas bases antárticas.

Es decir, las actividades aeronáuticas espaciales y subacuáticas se diferencian más por el entorno en que se desarrollan que por

Figura 7. Buceadores deportivos realizando inmersión en lagos de alta montaña a 2.400 m de altitud (A y B) y en un embalse sobre una población sumergida (C). No se trata de un fotomontaje. La habilidad del fotógrafo logró el curioso contraste de luces y colores manteniendo el enfoque en el plano aéreo y en el subacuático a ambos lados del hielo.



A y B: cortesía de Raül Baró, Diving Andorra, Principado de Andorra. C: fotografía de Carlo Ravenna. Cortesía de Guido Pfeiffer, Revista SUB.

Figura 8. Buceadores deportivos realizando inmersión bajo el hielo en lagos de alta montaña a 2.400 m de altitud.



A



B

Cortesía de Raül Baró, Diving Andorra, Principado de Andorra.

Figura 9. Buceadores científicos realizando inmersiones bajo el hielo en la Antártida.



Cortesía del Dr. Marcelo Mammana, República Argentina.

sus efectos directos sobre el cuerpo humano, que obedecen a los mismos mecanismos fisiológicos de adaptación y degasificación descompresiva, tanto si se trata de un astronauta, de un aviador o de un buceador. Unos y otros deberán seguir procedimientos similares, utilizando los mismos instrumentos de cálculo y, llegado el caso indeseable de un accidente, haciendo frente a una patología común cuya terapéutica seguirá los mismos procedimientos⁹. Los centros hiperbáricos situados en áreas extremas no se diferencian de los habituales a lo largo de las costas, generalmente en relación con el nivel de desarrollo de la actividad turística o profesional de

Figura 10. Cámara hiperbárica multiplaza instalada en la base "Jubany" de la Antártida.



Cortesía del Dr. Marcelo Mammana, República Argentina.

Figura 11. Cámara hiperbárica del Hospital de Katmandú (Nepal). Fue un obsequio, en los años sesenta, de Sir Edmund Hillary.



Cortesía del Dr. Rafael Bermejo.

cada zona (figs. 10 y 11). La medicina aeroespacial y la medicina subacuática forman parte, en buena medida, del mismo capítulo de la fisiología ambiental.

Bibliografía

1. Ríos Tejada A. Patología hipobarica en aviacion comercial y deportiva. JANO Temas de actualidad. 2009; diciembre:9-17.
2. Desola J. Barotraumatismo pulmonar. Síndrome de Hiperpresión Intratorácica. JANO. 2008;1.706:35-42.
3. Desola J. Enfermedad por descompresión. JANO. 2008;1.706:43-51.
4. Ríos Tejada F, Azofra García J, Valle Garrido J, Pujante Escudero A. Neurological manifestation of arterial gas embolism following standard altitude chamber flight: a case report. Aviat Space Environ Med. 1997;68:1025-8.
5. Files DS, Webb JT, Pilmanis AA. Depressurization in military aircraft: rates, rapidity, and health effects for 1,055 incidents. Aviat Space Environ Med. 2005;76:523-9.
6. Woodard D. Decompression sickness during simulated EVA. Aviat Space Environ Med. 2005;76:1188.
7. Paulev PE, Zubieta-Calleja G. High altitude diving depths. Res Sports Med. 2007;15:213-23.
8. Rañé Tarragó A. Patología ambiental en los deportes de montaña. JANO Temas de actualidad. 2009; diciembre:18-34.
9. Desola J. Accidentes disbáricos de buceo: guía de actuación inicial. JANO. 2008;1.707:40-7.