

MANUAL DE MEDICINA SUBACUÁTICA

Dr. Manuel Salvador Marín
Dr. Eladio Collado Boira
Dr. Vicente Aguilera Fernández



MANUAL DE MEDICINA SUBACUÁTICA

Director de la obra:
Manuel Salvador Marín

Codirectores:
Eladio Collado Boira Vicente Aguilera Fernández

Es propiedad de: © 2022 Amazing Books S.L. www.amazingbooks.es

Director editorial: Javier Ábrego Bonafonte

Razón social: C/ Rosa Chacel N.º 8 escalera 1ª oficina 4º C. 50018 Zaragoza – España

Primera edición: Septiembre 2022

ISBN: 978-84-17403-97-3

Cómo citar este libro: MANUAL DE MEDICINA SUBACUÁTICA. Manuel Salvador Marín, Eladio Collado Boira, Vicente Aguilera Fernández. Editorial Amazing Books, ISBN: 978-84-17403-98-0

Reservados todos los derechos.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra; solicite autorización en el teléfono +34 976 077 006, +34 917 021 970 o escribiendo al e-mail: info@amazingbooks.es

Amazing Books S.L. queda exonerada de toda responsabilidad ante cualquier reclamación de terceros que pueda suscitarse en cuanto a la autoría y originalidad de dicho material, así como de las opiniones y contenidos, que son intrínsecamente atribuibles a los autores.

Amazing Books también realiza esta obra con fines formativos y de divulgación científica sobre la investigación llevada a cabo por sus autores.

Las ilustraciones de este libro han sido elaboradas y redibujadas por Adrexy Álvarez.

Nota del Director: durante los años 90 fui médico de la FASCV e integrante del equipo médico de FEDAS, durante ese tiempo recogí de mis compañeros y de los buceadores multitud de fotos de lesiones ocurridas durante la práctica del buceo que después utilizaba en mis charlas.

Aún conservo las diapositivas y las imágenes escaneadas, algunas de las cuales he utilizado en este libro, he intentado atribuirles correctamente a sus autores, pero dado el tiempo transcurrido y la pérdida de algunas notas, es posible que me haya equivocado, y en alguna no figura su autor, por ello pido disculpas de antemano.

Para cualquier aclaración al respecto diríjanse escribiendo a la siguiente dirección de e-mail: info@amazingbooks.es

AMAZING BOOKS S.L. dispone de un repositorio en su web en donde se puede acceder a las «fe de erratas» o «fe de errores» de sus publicaciones cuando son detectadas tras la impresión del libro. A dicho repositorio se puede acceder a través del link con su PC o con un smartphone haciendo la lectura a través del código QR.



Introducción

La preparación de este manual de Medicina Subacuática se gestó durante el curso 2020-21 del Postgrado de Especialización en Medicina Hiperbárica y Subacuática de la Universitat Jaume I –UJI– de Castelló, con el objeto de que los alumnos dispusieran de un compendio donde pudieran recuperar y consultar fácilmente las enseñanzas que habían recibido *online*.

Las lecciones *online* se reestructuraron y completaron dándoles el formato de capítulos de libro, aportándoles nuevo material y referencias bibliográficas, en aquellos en los que nos pareció necesario, y añadiéndoles enlaces QR con vídeos de técnicas y prácticas, lo que además nos permite efectuar nuevas aportaciones y actualizaciones periódicas.

En la redacción de los capítulos han colaborado físicos, médicos, enfermeros, técnicos, policía subacuática del GEAS, forenses... todos ellos implicados desde hace años en nuestro país en el terreno de la fisiopatología de la inmersión, diagnóstico y tratamiento de los accidentes disbáricos, lesiones e intoxicaciones por animales marinos e investigación policial y forense de los accidentes fatales.

Todos aquellos que venían dedicándose vocacionalmente a tener operativas las escasas cámaras hiperbáricas del territorio español, diagnosticando y tratando los accidentes, y los dedicados a investigar, registrar y determinar las causas de los fallecimientos, ahora agrupados en la Asociación Española de Medicina Hiperbárica y Subacuática –ASEMHS–, se prestaron generosamente a colaborar en el proyecto de forma desinteresada y entre todos reunimos una importante casuística y experiencia.

Esperamos que este manual cumpla las expectativas de los lectores deseosos de profundizar en la Medicina Subacuática y agradecemos a nuestras familias su paciencia y comprensión por el tiempo que les hemos sustraído y por todas aquellas cosas que nuestro trabajo les impidió llevar a cabo.

Sin el soporte de la Facultad de Ciencias de la Salud y la Fundación Universidad Empresa –FUE– de la Universitat Jaume I no hubiera sido posible ni este manual ni los cursos de postgrado, por lo que les estamos muy reconocidos.

Y al final de estos agradecimientos, pero en absoluto en último lugar, nuestro sincero reconocimiento a D. Javier Ábrego y a Amazing Books, por su incondicional ayuda y confianza en nuestro proyecto y por habernos abierto un mundo absolutamente nuevo en la edición de libros y difusión del conocimiento.

Índice de contenidos

EQUIPO DE AUTORES

CAPÍTULO 1 Leyes físicas en el ambiente subacuático e hiperbárico

Prof. Dr. Vicente Aguilera

- 1.1** Presión y unidades de medida
- 1.2** Unidades absolutas del Sistema Internacional y unidades técnicas o de manómetro
- 1.3** Presión atmosférica y presión hidrostática
- 1.4** Ley de Boyle
- 1.5** Ley de Dalton o de las presiones parciales
- 1.6** Solubilidad de gases en líquidos: ley de Henry
- 1.7** Tensión superficial y ley de Laplace
- 1.8** Transmisión de la luz y el sonido en el medio acuático
- 1.9** Transferencia de calor en el medio acuático

CAPÍTULO 2 Fisiología de la respiración orientada al buceo *Dr.*

Manuel Salvador

- 2.1** Volúmenes respiratorios
- 2.2** Histéresis pulmonar
- 2.3** Retroceso elástico del pulmón
- 2.4** Ventilación pulmonar: resistencia al flujo y turbulencias
- 2.5** Máxima ventilación voluntaria: turbulencias y densidad
- 2.6** Colapso y cierre de los bronquiolos
- 2.7** Volumen de cierre (*closing volume*) y la capacidad al cierre (*closing capacity*)

2.8 Conclusiones

2.9 Densidad de los gases e intercambio gaseoso pulmonar

2.10 Ventilación y CO₂ en los buzos

CAPÍTULO 3 La preinmersión HOWI (*Head-Out Water Immersion*)

Dr. Manuel Salvador

3.1 ¿Qué es HOWI?

3.2 Cuando nos introducimos en el agua

3.3 La posición HOWI

3.4 Gasto cardíaco

3.5 Repercusión sobre el ventrículo izquierdo

3.6 Inestabilidad ortostática en posición HOWI

3.7 Cambios ventilatorios en HOWI

3.8 ¿Qué hacía Cousteau?

3.9 ¿Por qué silban las amas?

3.10 Efectos del HOWI sobre el riñón

3.11 Aumento de la diuresis

3.12 Natriuresis

3.13 Resumen de la repercusión renal de HOWI en los buceadores

3.14 Afectación del sistema gastrointestinal en HOWI

3.15 Reflejo de la zambullida (*diving reflex*)

3.16 Basta con sumergir la cara

3.17 Mecanismo del *diving reflex* en esquema

3.18 Reflejo trigémico cardíaco y *diving reflex*

3.19 Shock termodiferencial

CAPÍTULO 4 El buceo en apnea y su patología *Dres. Joan Miquel*

Batle, Francisco Llopis y Manuel Salvador

4.1 La apnea deportiva

4.2 Modalidades de la apnea

4.3 Fisiología de la apnea

4.4 Patologías disbáricas propias de los apneístas

CAPÍTULO 5 El buceo con equipos autónomos *D. Fernando Aguirre*

- 5.1 Buceo con aire comprimido y con mezclas nitrox o EAN (*Enriched Air Nitrox*)
- 5.2 Buceo en lagos de montaña
- 5.3 Sistemas para adaptar las tablas de buceo de mar para su uso en altitud
- 5.4 Planificación de la inmersión en altitud
- 5.5 Buceo técnico: mezclas binarias y ternarias, heliox y trimix
- 5.6 Los *rebreathers* o recicladores para buceo
- 5.7 Recicladores monofásicos y bifásicos
- 5.8 ¿Hemos hecho realidad un sueño?
- 5.9 Síncope de la emersión en el buceo con reciclador

CAPÍTULO 6 El buceo con campanas y umbilicales *D. Fernando Aguirre*

- 6.1 Campana húmeda y campana seca
- 6.2 ¿Cuál es la diferencia entre una manguera y un umbilical?
- 6.3 Comunicaciones en el umbilical
- 6.4 Guíndola
- 6.5 Campana húmeda
- 6.6 Campana seca o torreta (inmersiones a intervención)
- 6.7 Buceo a saturación
- 6.8 Problemas médicos en el buceo a saturación

CAPÍTULO 7 Otros trabajos en ambientes hiperbáricos *Dres. Pablo Puerto y Pere Ureta*

- 7.1 Cámaras hiperbáricas sanitarias
- 7.2 Personal sanitario en cámaras hiperbáricas
- 7.3 Tuneladoras de escudo de presión

CAPÍTULO 8 Reconocimiento médico de aptitud para buceo deportivo, profesional y trabajos en ambiente hiperbárico *Dres. Emilio Salas y Manuel Salvador*

- 8.1** Buceadores profesionales, buzos mariscadores y guías e instructores de buceo recreativo
- 8.2** Buceo deportivo y buceo científico
- 8.3** Buceo recreativo
- 8.4** ¿Cómo debería estructurarse el reconocimiento médico de un buceador profesional?
- 8.5** Pruebas complementarias
- 8.6** Contraindicaciones relativas/temporales
- 8.7** Contraindicaciones absolutas y permanentes
- 8.8** Test de tolerancia a la presión y al oxígeno
- 8.9** Bucear después de la COVID-19
- 8.10** ¿Qué formación debe tener el médico reconocedor?
- 8.11** ¿Cómo debemos extender el documento que acredita el reconocimiento médico?

CAPÍTULO 9 El buceador accidentado *Dres. Pablo Puerto y Javier Madero*

- 9.1** Asfixia por inmersión
- 9.2** Consenso del Congreso Mundial de 2002
- 9.3** Investigación del accidente
- 9.4** Hipotermia
- 9.5** Inmersión y pérdida de calor
- 9.6** Inconvenientes de los «trajes secos» de buceo
- 9.7** Manejo de la hipotermia accidental severa
- 9.8** Definición de hipotermia accidental
- 9.9** Hechos a destacar en hipotermia
- 9.10** Hipotermia en víctimas traumáticas
- 9.11** Clasificación etiológica de las hipotermias
- 9.12** Medición de la TCC (temperatura corporal central)

- 9.13** Clasificación de la hipotermia en la 1ª asistencia y según la situación clínica
- 9.14** Guías de reanimación prehospitalaria según el grado de hipotermia
- 9.15** SVA en hipotermia
- 9.16** *Afterdrop* o efecto de recaída
- 9.17** El colapso o shock de recalentamiento
- 9.18** Colapso perirrescate
- 9.19** Recalentamiento
- 9.20** Recalentamiento prehospitalario
- 9.21** Generalidades de los accidentes disbáricos

CAPÍTULO 10 Barotraumas *Dr. Manuel Salvador*

- 10.1** Generalidades: mecanismos de producción
- 10.2** Patología del área ORL en buceadores
- 10.3** Vértigo alternobárico
- 10.4** Otros barotraumas (oculares, dentales, gástricos)

CAPÍTULO 11 Barotrauma pulmonar y embolia arterial gaseosa *Dr. Manuel Salvador*

- 11.1** Causas del barotrauma pulmonar expansivo (BPE)
- 11.2** Neumomediastino y enfisema subcutáneo
- 11.3** Neumoperitoneo asociado a neumomediastino
- 11.4** Neumotórax
- 11.5** Embolia arterial gaseosa (EAG) y fenómenos de atrapamiento gaseoso
- 11.6** Tratamiento de las EAG
- 11.7** Tratamiento inicial de un EAG
- 11.8** Tratamiento definitivo de los aeroembolismos

CAPÍTULO 12 Enfermedad por descompresión *Dr. Manuel Salvador*

- 12.1** Historia

- 12.2** Fisiopatología enfermedad por descompresión (burbujas)
- 12.3** Enfermedad por descompresión embolígena
- 12.4** Clínica de la enfermedad por descompresión
- 12.5** Enfermedad por descompresión del oído interno y laberinto
- 12.6** Contradifusión isobárica y afectación audiovestibular
- 12.7** Alteraciones del comportamiento y enfermedad por descompresión
- 12.8** Manifestaciones musculoesqueléticas
- 12.9** Circunstancias favorecedoras de una enfermedad por descompresión
- 12.10** Generalidades del tratamiento de la enfermedad por descompresión
- 12.11** Tratamiento prehospitalario de la enfermedad por descompresión
- 12.12** Traslado al centro hospitalario
- 12.13** Tratamiento hospitalario de la enfermedad por descompresión
- 12.14** Incidencias durante la tabla de tratamiento

CAPÍTULO 13 El buceador crítico en la cámara hiperbárica *Dr. Javier Madero*

- 13.1** Una cámara hiperbárica no es una UCI
- 13.2** Cambios fisiológicos en el interior de la cámara hiperbárica
- 13.3** Preparación del paciente para el tratamiento en cámara hiperbárica
- 13.4** Monitorización del paciente en el interior de la cámara hiperbárica
- 13.5** Sedación y soporte ventilatorio en la cámara hiperbárica
- 13.6** Desfibrilación en la cámara hiperbárica
- 13.7** ¿Hace falta desfibrilar en el interior de la cámara hiperbárica?

CAPÍTULO 14 Instalaciones hiperbáricas de uso médico *D. Óscar Gómez*

- 14.1** Nota del director
- 14.2** Cámaras monoplazas y multiplazas
- 14.3** Evaluación de una cámara hiperbárica multiplaza
- 14.4** Normativa
- 14.5** Cámara, antecámara y SAS
- 14.6** Confort y Seguridad
- 14.7** Instalación de oxígeno, otros gases y exhaustación al exterior
- 14.8** Instalaciones eléctricas de bajo voltaje
- 14.9** Seguridad y prevención de incendios
- 14.10** Limpieza y desinfección

CAPÍTULO 15 Intoxicaciones por gases respiratorios y otros *Dres. Javier Madero y Manuel Salvador*

- 15.1** Narcosis por nitrógeno
- 15.2** Intoxicación por oxígeno
- 15.3** Hiperoxia (efecto Paul Bert)
- 15.4** Toxicidad pulmonar (efecto Lorrain Smith)
- 15.5** Hipercapnia o intoxicación por CO₂
- 15.6** Crisis de hipercapnia
- 15.7** Síndrome nervioso de las altas presiones (HPNS en inglés)
- 15.8** Contaminantes

CAPÍTULO 16 Enfermedades profesionales de los buzos y lesiones crónicas *Dr. Manuel Salvador*

- 16.1** La incidencia de osteonecrosis disbárica varía mucho
- 16.2** Localización de la osteonecrosis disbárica
- 16.3** Diagnóstico diferencial en la osteonecrosis disbárica
- 16.4** Fisiopatología de la osteonecrosis disbárica en el buceo
- 16.5** Lesiones crónicas del área ORL en los buzos
- 16.6** Efectos a largo plazo del buceo sobre la función pulmonar

16.7 Efectos sobre el sistema nervioso

CAPÍTULO 17 Lesiones ponzoñosas por animales marinos *Dr.*

Manuel Salvador

17.1 Celentéreos

17.2 Especies implicadas

17.3 Clínica de la picadura por celentéreos

17.4 Lesiones por peces

17.5 Mordeduras de peces

17.6 Descargas eléctricas

17.7 Lesiones por cefalópodos

17.8 Otros animales ponzoñosos

17.9 Tratamiento de las picaduras de erizo

17.10 Toxinas asociadas al consumo de productos del mar

CAPÍTULO 18 Estudio *postmortem* de un accidente de buceo *D.*

Fernando Aguirre y Dr. Josep María Casadesús

18.1 Análisis del escenario (Policía subacuática)

18.2 La necropsia de un buceador

Caso n.º 1 Buceador «rojo» (ahogamiento): hipótesis

Caso n.º 2 Buceador «rojo» (ahogamiento): conclusiones

APÉNDICE Direcciones útiles y protocolos de actuación iniciales

- Protocolo de recogida de datos por vía telefónica sobre un accidente de buceo
- Protocolo de la Unidad de Terapéutica Hiperbárica del HGUCS. Tratamiento Hospitalario de los Accidentes Disbáricos
- Protocolo para el tratamiento con OHB de la intoxicación por monóxido de carbono (CO)

Adscripción del equipo de autores

DIRECTOR DE LA OBRA

Dr. Manuel Salvador Marín

Unidad Terapéutica Hiperbárica en Hospital Gral. Univ. de Castellón

CODIRECTORES

Prof. Dr. Eladio Collado Boira

Decano de la Facultad de Ciencias de la Salud de la UJI

Prof. Dr. Vicente Aguilera Fernández

Catedrático de Física Aplicada. Jefe de Laboratorio de Biofísica Molecular. Universitat Jaume I

COLABORADORES

D. Fernando Aguirre

Cabo 1º Jefe del GEAS (Guardia Civil)

D. Leonardo Alperi

Unidad Terapéutica Hiperbárica. Hospital Gral. Univ. de Castellón

Dr. Joan Miquel Batle

Unidad Hiperbárica MEDISUB. Clínica Juaneda. Palma de Mallorca

Dña. Margarita Bertolín

Unidad Terapéutica Hiperbárica. Hospital Gral. Univ. de Castellón

Dr. Josep María Casadesús

Servicio de Patología Forense. Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Cataluña

D. Óscar Gómez

Técnico Camarista. Unidad Terapéutica Hiperbárica. Hospital Gral. Univ. de Castellón

Dr. Josep María Inoriza

Unidad Hiperbárica. Hospital de Palamós

Dr. Francisco Llopis

Médico de Urgencias. Unidad Terapéutica Hiperbárica. Hospital Gral. Univ. de Castellón

Dr. Javier Madero

Médico Intensivista. Unidad Hiperbárica Consorcio Hospital Provincial de Castellón

Dr. Pablo Puerto

Cirujano. Unidad Hiperbárica del Hospital Universitario de Canarias

Dr. Emilio Salas

ORL, Unidad Hiperbárica del Hospital San Carlos. San Fernando (Cádiz)

Dra. Eva Sanz

Médico RHB. Centro GF (Madrid)

Dr. Juan Traver

Médico Generalista. Unidad Terapéutica Hiperbárica. Hospital Gral.
Univ. de Castellón

Dr. Pere Ureta

Médico de Urgencias. BARIMED

CAPÍTULO 1

LEYES FÍSICAS EN EL AMBIENTE SUBACUÁTICO E HIPERBÁRICO

Prof. Dr. Vicente Aguilera

**CONTENIDOS ADICIONALES:
LEYES FÍSICAS EN EL AMBIENTE SUBACUÁTICO E HIPERBÁRICO**



CAPÍTULO 1

LEYES FÍSICAS EN EL AMBIENTE SUBACUÁTICO E HIPERBÁRICO

Prof. Dr. Vicente Aguilera

En este capítulo se describen algunas leyes físicas que intervienen en la fisiología humana cuando nuestro organismo se encuentra en un ambiente subacuático (buceo profesional o deportivo) o hiperbárico (sometido a presiones superiores a la atmosférica habitual debido a las condiciones de trabajo o al tratamiento en una cámara hiperbárica, como se verá más adelante). Estas leyes físicas tienen que ver, en primer lugar, con las variaciones de presión que se producen con la profundidad dentro del agua y con los efectos del aumento de la presión en la mezcla de gases que respiramos. En segundo lugar, con el efecto de la presión externa sobre la cantidad de gases disueltos en los vasos sanguíneos y en otros tejidos. La física de la transmisión del sonido y la propagación de la luz en el agua también se menciona, aunque su importancia es mucho menor.

1.1 Presión y unidades de medida

Se define la presión (P) como el cociente entre una fuerza (F) y el área de la superficie sobre la que actúa (S): $P = F / S$. Esa fuerza puede tener orígenes diversos: los choques de las moléculas de un gas contra las paredes donde se contiene, la tensión en las paredes de una arteria,

el peso (fuerza de atracción de la tierra) del fluido, entre otros más. Esta presión debida al peso de un fluido (líquido o gas) es la que tiene más interés para nosotros. La presión atmosférica a la que estamos habituados (1 ata a nivel del mar) no es más que la presión debida al peso del aire que hay en la atmósfera terrestre y su disminución con la altura sobre el nivel del mar se debe a la menor cantidad de aire que hay por encima de una cierta altura. De modo análogo, la presión en un líquido como el agua de mar aumenta con la profundidad por ser mayor el peso total del agua por encima de esa profundidad. Como se muestra en la **Tabla 1**, la variación de la presión con la altura sobre el nivel del mar y la variación con la profundidad en el agua son muy distintas debido a la enorme diferencia de las densidades del agua (1000 kg/m^3) y del aire ($1,29 \text{ kg/m}^3$, a nivel del mar y temperatura ambiente). Una regla práctica muy útil para cálculos rápidos es tomar una disminución de la presión de 0,1 ata cada 1000 m de altitud y un aumento de 1 ata cada 10 m de profundidad.

Tabla 1

Variación de la presión con la altura sobre el nivel del mar y con la profundidad en el agua

Altitud (m)	Presión (ata)	Profundidad (m)	Presión (ata)
0	1	0	1
1000	0,89	10	2
2000	0,78	20	3
3000	0,69	30	4
4000	0,61	40	5
5000	0,52	50	6

1.2 Unidades absolutas del Sistema Internacional y unidades técnicas o de manómetro

Puesto que en la vida en nuestro planeta siempre está presente la presión atmosférica, es habitual para muchas aplicaciones prácticas referirse no a la presión absoluta, sino a la diferencia entre dicha presión absoluta y la presión atmosférica. Esa diferencia se conoce como presión relativa, presión manométrica o, en los textos en inglés, *gauge pressure*.

$$P \text{ manométrica} = P \text{ absoluta} - P \text{ atmosférica}$$

La unidad de la presión en el Sistema Internacional (SI) es el newton (N) por metro cuadrado (m^2) y recibe el nombre de pascal (Pa). 1 Pa es una presión muy pequeña en comparación con la presión atmosférica a nivel del mar (que es aproximadamente 10^5 Pa o 100 kPa). Sin embargo, hay otras unidades que se emplean con más frecuencia y que se recogen en la **Tabla 2**. Algunas de esas unidades hacen referencia a la longitud de una columna de líquido —generalmente mercurio (Hg) o agua— ya que, como veremos a continuación, la presión debida a una columna de líquido es proporcional a su altura. En la misma tabla aparecen ciertas unidades de presión (bar, mca, msw) que se emplean casi exclusivamente para expresar la presión barométrica o relativa. Las presiones relativas en el cuerpo humano (como la tensión arterial, la tensión ocular, etc.) suelen expresarse en mmHg o en $\text{cm H}_2\text{O}$.

Tabla 2
Unidades de presión

Unidad	Definición
Pascal (Pa)	N/m^2
Atmósfera (ata)	P del aire a nivel del mar (101,3 kPa)
«kg fuerza» o «kg»	kg/cm^2
mmHg (Tor)	P de una columna de 1 mm de mercurio
$\text{cm H}_2\text{O}$	P de una columna de 1 cm de agua
psi	peso de 1 libra/pulgada ²

bar	10 ⁵ Pa (100 kPa)
msw	P de una columna de 1 m de agua de mar

Figura 1

Imagen de un manómetro de los utilizados para medir la presión relativa (*gauge*) en nuestra cámara hiperbárica. Nótese el uso de las unidades «bar» y «msw»



Fuente: Manuel Salvador

Para facilitar la conversión de presiones de unas unidades a otras se facilita la siguiente tabla con factores de conversión en la que se han resaltado los de uso más frecuente:

Tabla 3

Factores de conversión entre las diferentes unidades de presión

	kPa	ata	bar	mmHg	cm H ₂ O	psi	mca	msw
kPa =	1	9,87×10 ⁻³	0,01	0,75	10,2	0,145	0,102	0.1
ata =	101,3	1	1,013	760	1030	14,7	10,33	10.1
bar =	100	0,987	1	750	1020	14,5	10,2	10
mmHg	0,133	1,32×10 ⁻³	1,33×10 ⁻³	1	1,36	1,93×10 ²	1,36×10 ⁻²	1,33×10 ²
cmH ₂ O	0,098	9,68×10 ⁻⁴	9,68×10 ⁻⁴	0,736	1	1,42×10 ²	0,01	0,98×10 ²
psi =	6,89	6,8×10 ²	6,89×10 ²	51,7	70,3	1	0,70	0,69
mca =	9,8	0,10	0,1	76,5	102	1,48	1	0,98
msw =	10	9,87×10 ⁻²	0,1	7,5	102	1,45	1,02	1

Una equivalencia entre unidades útil para recordar es la siguiente: 1 bar = 10 msw = 1 ata = 100 kPa = 760 mmHg.

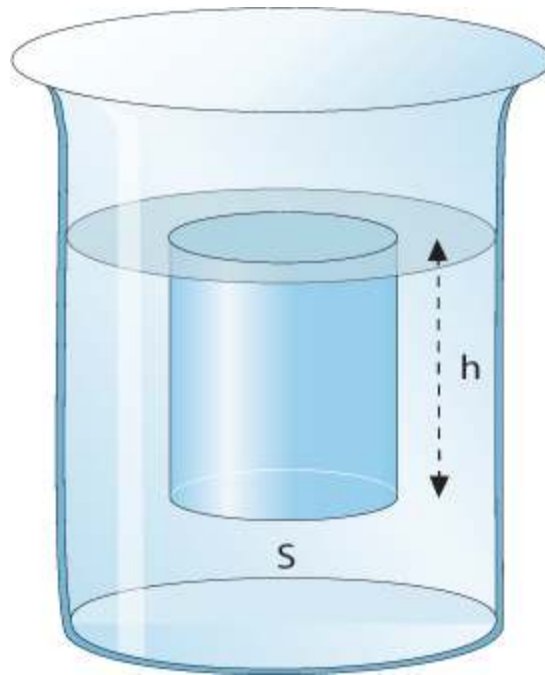
1.3 Presión atmosférica y presión hidrostática

Los líquidos, a diferencia de los gases, son muy poco compresibles (habitualmente, se consideran incompresibles) y, como consecuencia, la presión ejercida sobre un punto de un líquido en equilibrio se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y a todos los puntos de este. Esto se conoce como el Principio de Pascal. Constituye el fundamento de las prensas hidráulicas, elevadores o accionadores hidráulicos, etcétera.

Veamos con un ejemplo sencillo cómo varía la presión con la altura (o la profundidad) en un líquido. La **Figura 2** muestra un recipiente con un líquido en el cual existe una diferencia de presión entre un punto cualquiera de la superficie y otro punto situado a una profundidad h .

Figura 2

Variación de la presión con la altura en un líquido



Esa diferencia de presiones (Δp) se debe exclusivamente al peso del líquido que hay entre ambos puntos separados por la distancia vertical h . Consideremos un cierto volumen de líquido $V = S h$. Su peso es la masa m por la aceleración de la gravedad g , es decir, mg , y esa masa puede expresarse como el producto del volumen V por la densidad del líquido ρ , es decir, $mg = \rho S h g$. Dividiendo esa fuerza por la superficie S sobre la que actúa llegamos a la diferencia de presiones que buscamos:

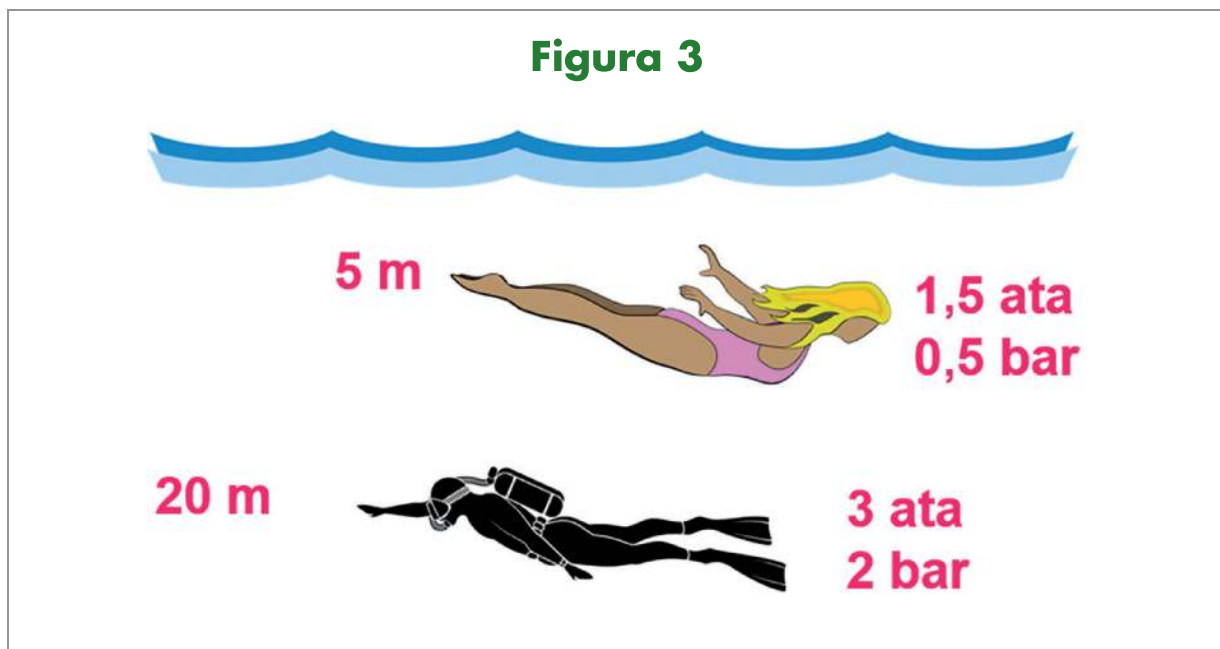
$$\Delta p = \rho h g$$

Esta proporcionalidad entre presión y columna de un líquido es el origen de varias de las unidades que acabamos de ver. En los gases (por ejemplo, en el aire), la relación entre Δp y h deja de ser lineal, ya que la densidad del gas varía considerablemente con la presión. No

obstante, para pequeñas altitudes sirve la regla práctica de 0,1 ata menos cada 1000 m de altitud.

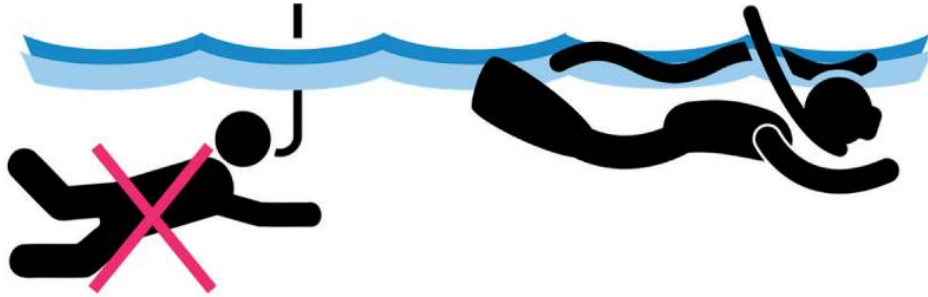
Ejemplo

La presión a la que está sometido un buceador aumenta 1 atmósfera (1 ata) cada 10 m de profundidad (es la aproximación habitual de 1 ata \approx 1 bar = 10 msw). En la superficie del agua tendremos 1 ata. A 90 m de profundidad, la presión será de 10 ata. A esos 90 m, un manómetro registraría 9 bar (que es la presión relativa).



A una profundidad de 1 m, la presión hidrostática del agua (unos 74 mmHg) ya es suficiente para impedir la respiración normal del aire atmosférico (1 ata) debido a la fuerza externa que han de vencer los músculos responsables de la ventilación. Esto hace inviable el uso de un esnórquel para el buceo, aunque se haga a poca profundidad. Por este motivo, los tubos de esnórquel no suelen superar los 35-45 cm.

Figura 4



1.4 Ley de Boyle

Todos los gases se comportan igual a presiones y temperaturas con relevancia fisiológica. En estas condiciones, satisfacen la misma relación entre la presión (P), su volumen (V) y la temperatura absoluta (T) (expresada en la escala Kelvin, en la que $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ K}$). Esta relación se llama ley universal de los gases ideales y se expresa como:

$$P V = n R T$$

En la expresión anterior R es una constante ($8,31\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$) y n es el número de moles de gas, proporcional a la masa de gas contenida en ese volumen. Una consecuencia de esta ley es que, si se mantiene la temperatura constante, la presión y el volumen de una cierta cantidad de gas son inversamente proporcionales. Esta relación se conoce como **ley de Boyle**.

$$P V = \text{constante}$$

Si comparamos los volúmenes a dos presiones diferentes tendremos la relación:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{o bien: } P_1 / P_2 = V_2 / V_1$$

Puesto que la temperatura corporal se mantiene prácticamente constante, los volúmenes gaseosos de las cavidades aéreas no rígidas del organismo disminuyen en proporción inversa a la presión externa sobre ellos. Esa variación es pequeña con la altitud sobre el nivel del mar, pero considerable con la profundidad dentro del agua (**Figura 5**).

En condiciones subacuáticas, el efecto de la presión externa sobre el volumen de los pulmones y del oído medio es extraordinariamente importante. El volumen de aire en los pulmones se reduce a la mitad al descender sin respirar desde la superficie hasta los 10 m de profundidad. La figura siguiente ilustra estas variaciones de volumen.

Figura 5

Variación de un volumen gaseoso con la presión debida a la altitud sobre el nivel del mar (en azul) o debida a la profundidad en el agua (violeta) suponiendo que la temperatura no cambia

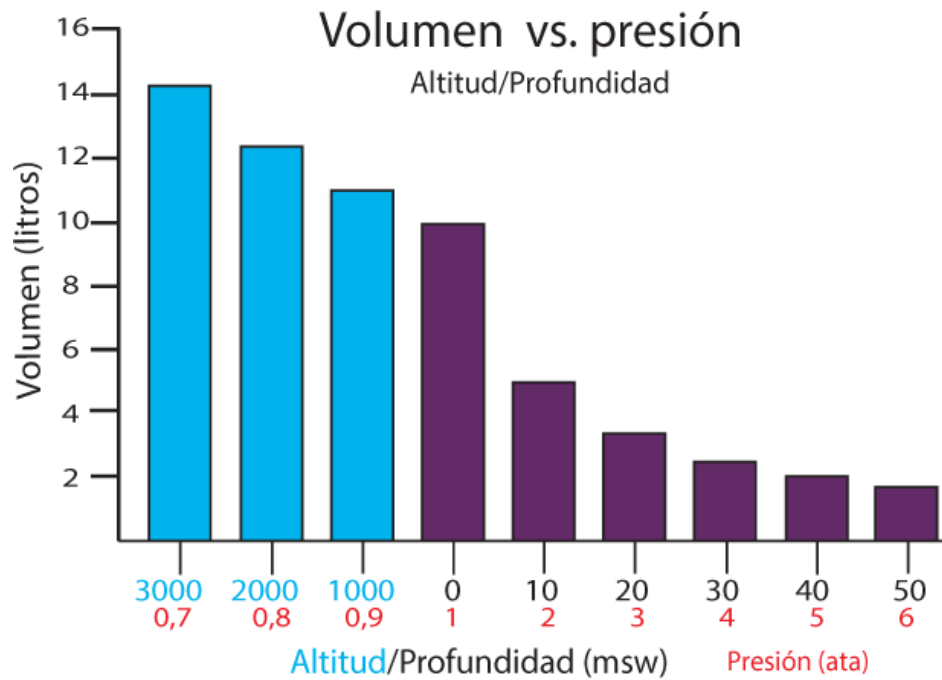


Figura 6

Variaciones con la profundidad del volumen del aire en los pulmones (en condiciones de apnea) y de cualquier otro volumen gaseoso cerrado (como puede ser una burbuja de gas que asciende a la superficie)



Posteriormente, al hablar de la flotabilidad, veremos qué consecuencias tiene esta disminución de volumen del aire de los pulmones de un buceador en apnea (que contiene la respiración durante una inmersión) al aumentar la presión hidrostática. Nótese que la ley de Boyle se aplica a una masa de gas determinada (como sucede con el aire en los pulmones de un apneísta o de un buceador con equipo autónomo que contiene la respiración).

En el buceo autónomo, la regla de oro es «no dejar de respirar». Contener la respiración durante el ascenso es un motivo de accidente que puede ser mortal. Si un buzo se encuentra a 20 m respirando aire a la presión de 3 ata (es decir, la presión ambiental, la del agua a esa profundidad) y emerge conteniendo la respiración, el aire que llenaba sus pulmones a 3 ata ocupará un volumen 3 veces mayor en condiciones de 1 ata (superficie). El barotrauma pulmonar es más que probable.

El ejemplo anterior se entiende mejor si tenemos presente que en el buceo autónomo la presión del aire respirado y la presión ambiental (la presión hidrostática a esa profundidad) son la misma. Esa es la función que realiza el regulador del equipo autónomo. Por lo tanto, el volumen de los pulmones no cambia (**Figura 7**). A pesar del papel del regulador, aunque el volumen respiratorio en profundidad es el mismo que en la superficie, la presión y la densidad del gas es mayor. Por tanto, la ventilación requiere mayor esfuerzo al tener que mover una mayor masa de aire, lo cual limita la capacidad de trabajo del buzo.

Omitimos aquí otros detalles relacionados con la posición del buceador en el agua (vertical u horizontal) y la diferente presión hidrostática según la profundidad a la que se encuentren las distintas partes del cuerpo. Aunque estas variaciones son en apariencia de escasa magnitud, pueden tener importancia para la estabilidad del buceador.

Para terminar este apartado, mencionemos que otra consecuencia de la ley universal de los gases ideales es la proporcionalidad entre la temperatura y la presión de un gas que ocupa un volumen determinado: $P = (n R / V) T$. La compresión de un gas hace que aumente su temperatura y, a la inversa, la expansión de un gas da lugar a su enfriamiento. Cuando se comprime aire para cargar una botella de buceo (por ejemplo, hasta 200 bar), se calienta. Hay que refrigerar la botella para conseguir un llenado más efectivo (**Figura 8**).

Figura 7

Variaciones con la profundidad del volumen del aire en los pulmones.
Panel izquierdo: en condiciones de apnea. Panel derecho: con un
equipo autónomo de buceo

