

UNIDAD Nº 9

Principios de la Teoría de la Descompresión y Cálculos de Autonomía

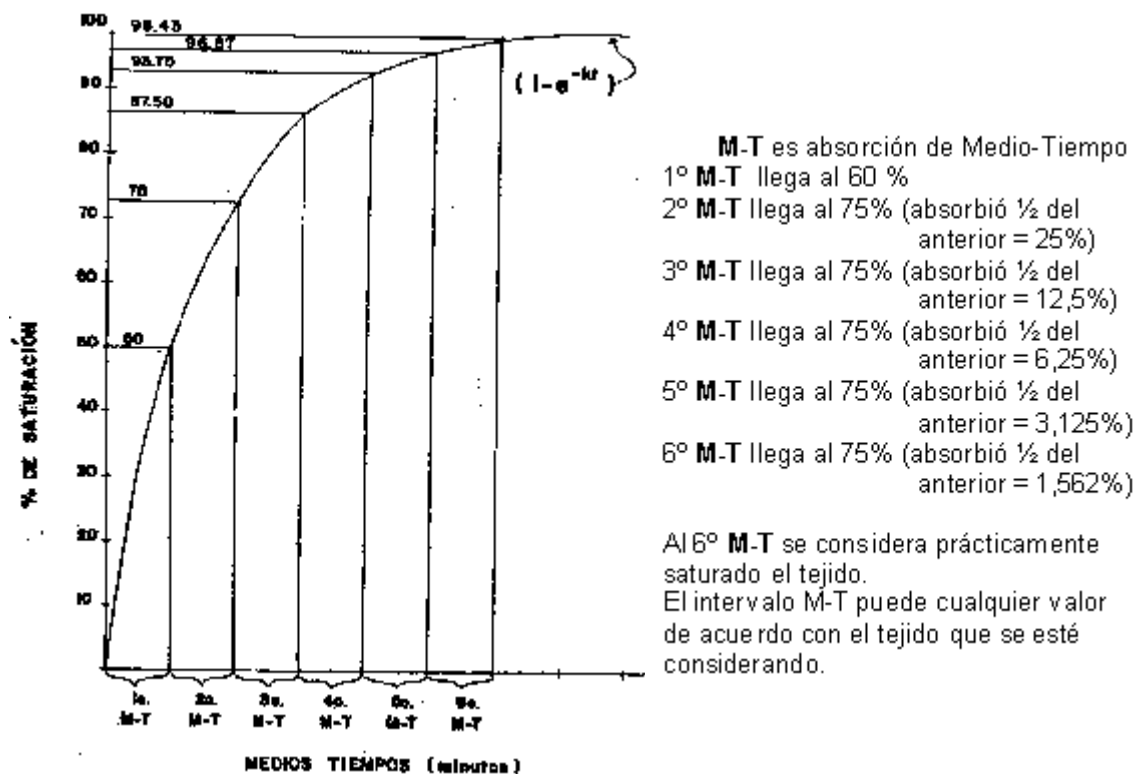
El objetivo de este capítulo es que el buzo conozca más a fondo, qué sucede realmente en su cuerpo cuando está respirando gases a presión mayor que la atmosférica y así, en un momento dado, tenga la capacidad de evaluar lo importante que son los procedimientos de compresión y de descompresión, ya sea durante una inmersión o durante un tratamiento dentro de una cámara hiperbárica, así como calcular su autonomía y consumo.

ANTECEDENTES

Sabemos que el cuerpo humano absorbe nitrógeno cuando la presión del aire que se respira aumenta. Luego de un determinado tiempo, la sangre (de acuerdo con la ley de Henry), llega a saturarse de este gas para esa presión. Este nitrógeno es llevado por medio de la sangre a los capilares y difundido a los tejidos, produciendo la misma presión del nitrógeno que hay en los pulmones. Sin embargo, la irrigación de la sangre y la solubilidad del nitrógeno varía con los diferentes tejidos, de tal manera que el tiempo requerido por las diferentes partes del cuerpo para llegar a ser saturadas sea diferente.

SATURACIÓN Y DESATURACIÓN DE LOS TEJIDOS

La absorción y eliminación del nitrógeno en los tejidos no llega a ser instantánea: según la hipótesis del fisiólogo inglés J. S. Haldane siguen un patrón de una curva exponencial, es decir, al ser expuestos a una presión mayor los tejidos absorberán más cantidad de gas al



principio y cada vez menos conforme se van acercando a la saturación.

Al disminuir presión ambiente la eliminación de los gases será más rápida al principio que al final.

También dijimos que para cada tejido el tiempo de saturación y desaturación es diferente, dependiendo de la solubilidad y de la irrigación de la sangre. La solubilidad determina cuánto gas puede ser disuelto en un tejido. La irrigación de la sangre será el sistema de transporte para llevar el nitrógeno del alvéolo al tejido (saturación) y del tejido al alvéolo (desaturación). La velocidad de absorción y eliminación del nitrógeno en un tejido dependerá, principalmente, de la irrigación de la sangre.



Ejemplo: el nitrógeno es aproximadamente cinco veces más soluble en un tejido graso que en un tejido acuoso lo que lo hace tener alta capacidad para almacenar el gas; sin embargo, tiene poca irrigación de sangre y, de esta manera, se saturará lentamente y será conocido como tejido "lento". El cerebro, que está bien irrigado de sangre, rápidamente absorberá y eliminará el nitrógeno y será conocido como tejido "rápido".

Basado en lo anterior y en su modelo exponencial de absorción y de eliminación del nitrógeno, Haldane, para poder cuantificar los niveles de saturación de varios tejidos del cuerpo (válido para inmersiones cortas), consideró unos intervalos, llamados "medios-tiempos", para la absorción y eliminación del nitrógeno y los estableció de la siguiente forma:

Cuando un buzo se encuentra a cierta profundidad, el tiempo que tome cualquier tejido específico en absorber/a mitad de la cantidad de gas del nivel de saturación ser el primer medio-tiempo para ese tejido específico, o sea, que absorbe el 50 por ciento.

El segundo medio-tiempo será el intervalo en que ese tejido absorba la mitad de gas de la cantidad que absorbió en el primer medio tiempo, es decir el 25 por ciento.

El tercer medio-tiempo ser el intervalo en que ese tejido absorba la mitad del gas de lo que absorbió el segundo medio tiempo, o sea el 12,5 por ciento. El cuarto medio-tiempo será el intervalo en que el tejido absorba la mitad del gas de la cantidad que absorbió en el tercer medio tiempo, o sea, el 6,25 por ciento.

El quinto medio-tiempo será el intervalo en que el tejido absorba la mitad del gas de la cantidad que absorbió en el cuarto medio-tiempo, o sea 3.125 por ciento.

El sexto medio-tiempo será el intervalo en que el tejido absorba la mitad de gas de la cantidad que absorbió en el quinto medio-tiempo, o sea, 1.5625 por ciento.

Si sumamos los porcentajes absorbidos por el tejido durante estos seis primeros intervalos de medio-tiempo, veremos que se llega casi al 100 por ciento de saturación como lo indica la figura de la página anterior.

Tomando los seis primeros medios-tiempos de cualquier tejido, podremos conocer en cuánto tiempo se saturan dichos tejidos del cuerpo, de acuerdo con su medio-tiempo asignado, así también, podremos conocer qué, cantidad de nitrógeno contienen para una profundidad o presión dada.

Haldane asignó 5 tipos de tejidos de medio-tiempo: de rápida saturación como es de 5 minutos, 10, 20, 40 y el más lento de 75 minutos.

Los tejidos-de medio-tiempo usados por la Marina de Estados Unidos en los que se basaron para calcular la tabla de descompresión fueron: 5, 10, 20, 40, 80 y 120 minutos. Sin embargo, se han tenido que considerar tejidos de medio-tiempo hasta de 1 000 minutos para inmersiones de extrema exposición.

CALCULO DE ABSORCIÓN DE GAS EN LOS TEJIDOS

Ejemplo: obtener la curva de saturación en función del tiempo y de la presión parcial del nitrógeno en un tejido de medio-tiempo de 5 minutos, de un buzo que se encuentra a 30

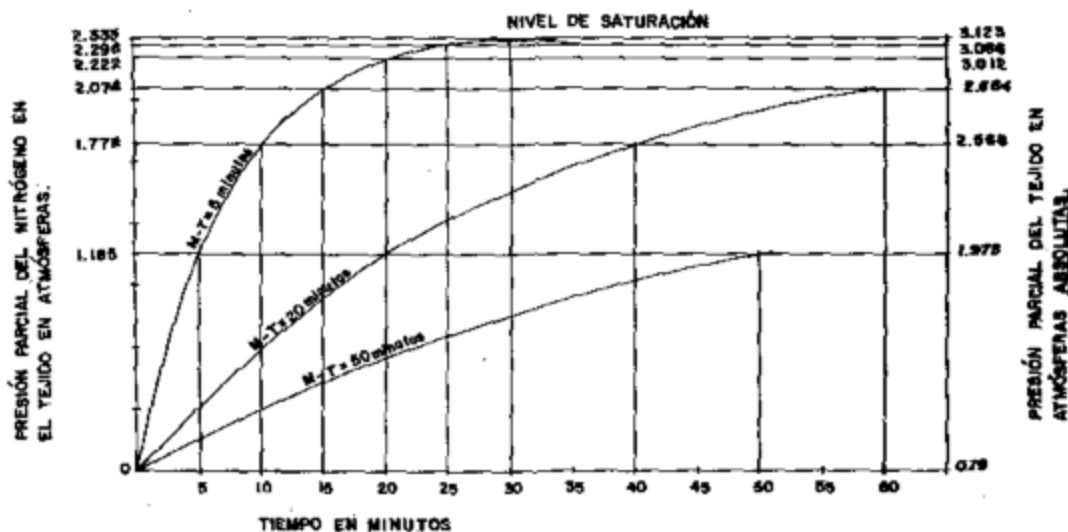


Fig. 7.2 Representación gráfica de la saturación de un tejido de M-T de 5 minutos, para un buzo a 30 metros de profundidad.



metros de profundidad. En la superficie nosotros respiramos aire a una atmósfera de presión. El 79 por ciento del aire es nitrógeno, por lo que su presión parcial es de 0,79 atmósferas. Esto significa que en la superficie, al nivel del mar, tenemos 0,79 de atmósfera de nitrógeno de presión en nuestro torrente circulatorio. Por lo tanto, nuestros tejidos están 100 por ciento saturados con 0,79 atmósferas de nitrógeno.

A 30 metros (100 pies) de profundidad estamos respirando el aire a una presión de 4 ATA de la cual el 79 por ciento será la presión parcial del nitrógeno, o sea 3,16 ATA. Ahora, de 0,79 ATA de nitrógeno en nuestro torrente circulatorio ha aumentado a 3,16 ATA. Esto hará una diferencia de presiones llamada gradiente de 2,37 atmósferas entre el torrente circulatorio y los tejidos del cuerpo que estaban saturados inicialmente con 0,79 atmósferas de nitrógeno. Como la presión en la sangre es mayor, el nitrógeno será "forzado" hacia los tejidos y conforme vaya transcurriendo el tiempo, el gradiente irá disminuyendo y, por lo tanto, los tejidos irán absorbiendo cada vez menor cantidad de nitrógeno (50 por ciento en cada M-T), hasta que llegue al nivel de saturación, donde las presiones de la sangre y tejidos se igualan y el gradiente se hace cero y los tejidos no absorben más gas. En la gráfica de la figura 7.2 analizaremos la forma de absorción de nitrógeno hasta llegar a la saturación de un tejido de medio-tiempo de 5 minutos.

El primer medio-tiempo, o sea, de 0 a 5 minutos, absorberá la mitad de 2,37 igual a 1,185 atmósferas.

Durante el segundo medio-tiempo, o sea, de 5 a 10 minutos, absorberá la mitad de 1,185 igual a 0,593 atmósferas, acumulando un total de $1,185 + 0,593 = 1,778$ atmósferas.

Durante el tercer medio-tiempo, o sea de 10 a 15 minutos, absorberá la mitad de 0,593 igual a 0,296 atmósferas, acumulando un total de $1,778 + 0,296 = 2,074$ atmósferas.

Durante el cuarto medio-tiempo, o sea de 15 a 20 minutos, absorbe la mitad de 0,296 igual a 0,148 atmósferas, acumulando un total de $2,074 + 0,148 = 2,222$ atmósferas.

Durante el quinto medio-tiempo, o sea, de 20 a 25 minutos, absorberá la mitad de 0,148 igual a 0,074 atmósferas, acumulando un total de gas de $2,222 + 0,074 = 2,296$ atmósferas.

Durante el sexto medio-tiempo, o sea, de 25 a 30 minutos, absorbe la mitad de 0,296 igual a 0,148 atmósferas, acumulando un total de gas de $2,296 + 0,148 = 2,444$ atmósferas.

Este valor obtenido de 2,44 atmósferas, es la presión de la cantidad de nitrógeno que almacenó durante 30 minutos un tejido de medio-tiempo de 5 minutos de un buzo que se encuentra a una profundidad de 30 metros. Si a 2,44 atmósferas le sumamos 0,79 atmósferas que tenía al iniciar la inmersión, hará un total de 3,23 atmósferas, lo cual resulta ser prácticamente la misma presión parcial del nitrógeno de aire que respiramos a dicha profundidad, por lo que concluimos que tal tejido ha llegado a su saturación.

Concluimos también, que el tiempo de saturación de cualquier tejido lo tendremos prácticamente en el 6º medio-tiempo. En el caso anterior como fue el tejido de medio-tiempo de 5 minutos, lo multiplicamos por 6 y resultó ser 30 minutos. El tiempo de desaturación de un tejido de medio-tiempo de 40 minutos será de 40 por 6 igual a 240 minutos. Para un tejido de medio-tiempo de 120 minutos será de 120 por 6, o sea, llegará a su saturación en 720 minutos. Se ha establecido que en 24 horas todos los tejidos del cuerpo están saturados.

Haldane, conociendo la presión parcial de cada tejido para una determinada profundidad y aplicando su teoría que dice: **cada tejido puede permitir un 50 por ciento de reducción de presión sin producir burbujas**, calculó sus tablas de descompresión. La Marina de Estados Unidos ha considerado, para el cálculo de sus tablas, el mismo principio, aunque con ciertas modificaciones.

ELIMINACIÓN DE GAS EN LOS TEJIDOS

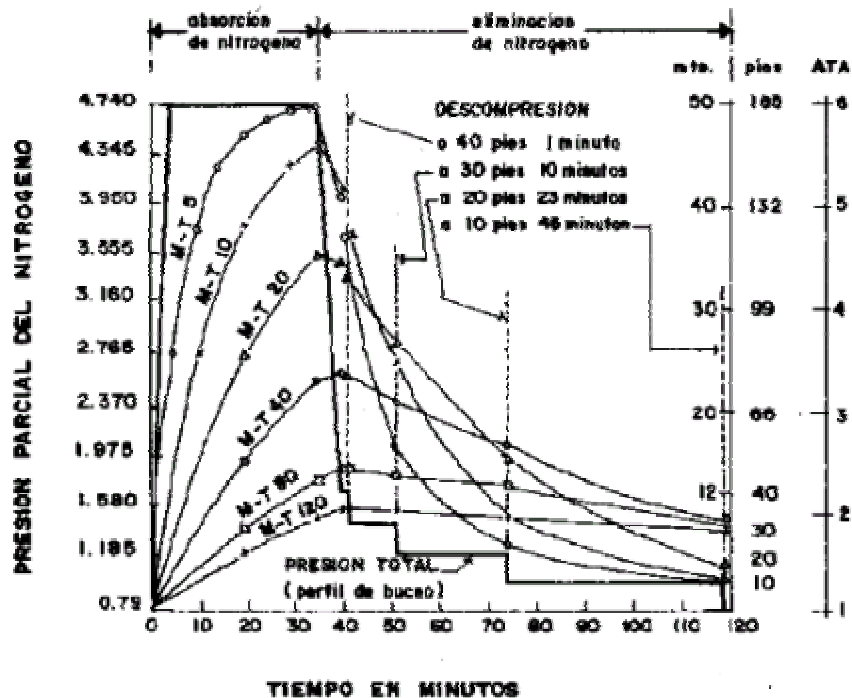
La eliminación del gas en los tejidos se lleva a cabo cuando la presión a la que está expuesto el buzo se disminuye, es decir, cuando asciende a la superficie, o sea, durante la descompresión. Conforme la presión ambiente va disminuyendo, la presión del aire que se respira irá disminuyendo en la misma cantidad, por lo que ahora la presión parcial del nitrógeno será menor en los pulmones y en el torrente circulatorio, y mayor en los tejidos. En este momento los tejidos pasarán ese exceso de nitrógeno a los capilares y de ahí a las venas, para ser eliminado en los pulmones durante la exhalación.

Si la descompresión es rápida o inadecuada, la sangre no podrá llevar ese nitrógeno en solución, sino que se formarán burbujas, exactamente en la misma forma que cuando se



abre una botella con agua mineral con gas, produciendo el accidente de descompresión.

Al igual que en la absorción de gas, en la eliminación los tejidos "rápidos" eliminarán más pronto el gas y los "lentos" más despacio. Debido a que los tejidos grasos almacenan más nitrógeno, éstos toman más tiempo en eliminar el exceso durante la descompresión, igual que los que tienen poca irrigación sanguínea. El objeto de la descompresión es llegar a la superficie lo más rápido posible sin causar accidentes de descompresión, o sea, eliminar el gas sin que se formen burbujas.



TABLAS DE DESCOMPRESIÓN EXPERIMENTAL DIVING UNIT (E.D.U.)

TABLAS DE TIEMPOS LÍMITE (lo marcado en rojo es el máximo modificado)

PROF		Límites de NO DESC															
PIES	MTS	Minutos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
10	3		60	120	210	300											
15	4,5		35	70	110	160	225	350									
20	6		25	50	75	100	135	180	240	325							
25	7		20	35	5	75	100	125	160	195	245	315					
30	9		15	30	45	60	75	95	120	145	170	205	250	310			
35	11	310	5	15	25	40	50	60	80	100	120	140	160	190	220	270	310
40	12	200	5	15	25	30	40	50	70	80	100	110	130	150	170	200	
50	15	100		10	15	25	30	40	50	60	70	80	90	100			
60	18	60		10	15	20	25	30	40	50	55	60					
70	21	50		5	10	15	20	30	35	40	45	50					
80	24	40		5	10	15	20	25	30	35	40						
90	27	30		5	10	12	15	20	25	30							
100	30	25		5	7	10	15	20	22	25							
110	33	20			5	10	13	15	20								
120	36	15			5	10	12	15									
130	39	10			5	8	10										
140	42	10			5	7	10										
150	45	5			5												
160	48	5				5											
170	51	5				5											
180	54	5				5											
190	57	5				5											

El correcto uso de las tablas de descompresión es indispensable para realizar un buceo seguro. Hay muchos factores que llevan a tener un accidente, la temperatura del agua, el tipo de trabajo que se realiza y los márgenes de accidentes de las mismas tablas. Las tablas U.S. Navy fueron realizadas bajo la observación de buzos profesionales en gran entrenamiento, esto está muy lejos de nuestra realidad, donde un buceador deportivo luego de salir de los cursos pierde su entrenamiento. Además los sistemas de seguridad para el apoyo del buceo son casi inexistentes. Malos medios de transporte, falta de centros médicos especializados en accidentes hiperbáricos y hasta la falta de cámaras hiperbáricas.

El uso de la tabla en sus valores límites hace riesgoso el buceo obligándonos a tomar coeficientes de seguridad. Estudios realizados en Australia en la década del 70 llevó a determinar nuevos valores de los límites de no descompresión. Para estos nuevos límites se tuvo en cuenta la incidencia del estado físico de los buceadores y los medios con que se contaba para auxiliar a un buceador en caso de tener un accidente.



Otros estudios realizados en el Instituto de Fisiología Aplicada de Seattle, en base a trabajos con ondas de ultrasonido para la detección de burbujas ,mediante reflexión de la onda. Llegaron a la conclusión que todos los buceadores que buceaban en los límites de no descompresión de la tabla U.N. Navy estaban propensos a desarrollar burbujas de nitrógeno en el sistema venoso, las que se denominan Burbujas de Silencio.

Diferentes estudios en otros centros de investigación llegaron a la misma conclusión. Tomando como estudios a buceadores expuestos a una profundidad de 30 metros por 25 minutos, límite de la tabla U.S. Navy, presentaba Burbujas de Silencio.

Basándose en diferentes trabajos los centros de estudio recomendaron el acortamiento de los límites de no descompresión para obtener un mayor margen de seguridad.

Si comparamos los límites de no descompresión de diferentes tablas (fig. 2) veremos que la tabla U.S. Navy tiene los límites más riesgosos.

METROS	U.S.Navy	Canadá	Francia	Inglaterra	Suiza
12	200	175	-----	137	120
15	100	75	80	72	75
18	60	50	50	46	54
21	50	35	30	38	35
24	40	25	25	27	25
27	30	20	20	23	22
30	25	15	10	18	20
33	20	12	10	16	17
36	15	10	10	12	15

Todo esto nos alerta y nos obliga a tomar márgenes de seguridad en el uso de la tabla ya que por más que se respeten los valores que figuran en ella, podemos sufrir accidentes por descompresión agravado con la falta de elementos de seguridad que cuenta un buceador que sufre un accidente.

El uso de una curva de seguridad puede ser la manera sencilla de obtener nuestro margen de seguridad..

Corriendo los límites en 15 minutos y tomando para las profundidades menores a 12 metros el valor de los 12 metros, que sería de 175 minutos, estaremos dentro de un margen de seguridad importante.

Otra medida de seguridad auxiliar es no bucear con descompresión. Una descompresión tiene muchos factores que nos pueden llevar a tener un accidente, nuestro estado físico, la falta de práctica para realizarla, la temperatura del agua y por último la misma tabla.

Hacer una parada de 3 metros durante 3 minutos en todos los buceos con aire comprimido.

Todas estas medidas nos darán mayor seguridad. Piense que nuestros lugares de buceo carecen de cámaras hiperbáricas y el traslado de la víctima tomaría varias horas, poniendo en riesgo la vida del accidentado.

El buceo es seguro si nosotros lo hacemos seguro.

A continuación se brindan las tablas para descompresión con aire, las cuales, sinceramente, cuanto menos veces te veas obligado a usarlas....mejor!!!!



PROFUNDIDAD		Tiempo de Fondo (minutos)	Tiempo hasta la 1ª etapa (min:seg)	E T A P A					Tiempo de Ascenso total (min:seg)	Grupo de Repetición
Pies	Metros			M	t	s	6	3		
40	12	200						0	00:40	*
		210	00:30					2	02:40	N
		230	00:30					7	07:40	N
		250	00:30					11	11:40	O
		270	00:30					15	15:40	O
		300	00:30					19	19:40	Z
50	15	100						0	00:50	*
		110	00:40					3	03:50	L
		120	00:40					5	05:50	M
		140	00:40					10	10:50	M
		160	00:40					21	21:50	N
		180	00:40					29	29:50	O
		200	00:40					35	35:50	O
		220	00:40					40	40:50	Z
240	00:40					47	47:50	Z		
60	18	60						0	01:00	*
		70	00:50					2	03:00	K
		80	00:50					7	08:00	L
		100	00:50					14	15:00	M
		120	00:50					26	27:00	N
		140	00:50					39	40:00	O
		160	00:50					48	49:00	Z
		180	00:50					56	57:00	Z
200	00:40					69	71:00	Z		
70	21	50						0	01:10	*
		60	01:00					8	09:10	K
		70	01:00					14	15:10	L
		80	01:00					18	19:10	M
		90	01:00					23	24:10	N
		100	01:00					33	34:10	N
		110	00:50				2	41	44:10	O
		120	00:50				4	47	52:10	O
		130	00:50				6	52	59:10	O
		140	00:50				8	56	65:10	Z
		150	00:50				9	61	71:10	Z
80	24	40						0	01:20	*
		50	01:10					10	11:20	K
		60	01:10					17	18:20	L
		70	01:10					23	24:20	M
		80	01:00				2	31	34:20	N
		90	01:00				7	39	47:20	N
100	01:00				11	46	58:20	O		
110	01:00				13	53	67:20	O		
120	01:00				17	56	74:20	Z		
130	01:00				19	63	83:20	Z		
140	01:00				26	69	96:20	Z		
150	01:00				32	77	110:20	Z		



PROFUNDIDAD		Tiempo de Fondo (minutos)	Tiempo hasta la 1ª etapa (min:seg)	E T A P A					Tiempo de Ascenso total (min:seg)	Grupo de Repetición
Pies	Metros			15	12	9	6	3		
90	27	30						0	01:30	*
		40	01:20					7	08:30	J
		50	01:20					18	19:30	L
		60	01:20					25	26:30	M
		70	01:10				7	30	38:30	N
		80	01:10				13	40	54:30	N
		90	01:10				18	48	67:30	O
		100	01:10				21	54	76:30	Z
		110	01:10				24	61	86:30	Z
		120	01:10				32	68	101:30	Z
	130	01:00		5	36	74		116:30	Z	
100	30	25						0	01:40	*
		30	01:30					3	04:40	I
		40	01:30					15	16:40	K
		50	01:20				2	24	27:40	L
		60	01:20				9	28	38:40	N
		70	01:20				17	39	57:40	O
		80	01:20				23	48	72:40	O
		90	01:10			3	23	57	84:40	Z
		100	01:10			7	23	66	97:40	Z
		110	01:10			10	34	72	117:40	Z
	120	01:10		12	41	78		132:40	Z	
110	33	20						0	01:50	*
		25	01:40					3	04:50	H
		30	01:40					7	08:50	J
		40	01:30				2	21	24:50	L
		50	01:30				8	26	35:50	M
		60	01:30				18	36	55:50	N
		70	01:20			1	23	48	73:50	O
		80	01:20			7	23	57	88:50	Z
		90	01:20			12	30	64	107:50	Z
		100	01:20			15	37	72	125:50	Z
120	36	15						0	02:00	*
		20	01:50					2	04:00	H
		25	01:50					6	08:00	I
		30	01:50					14	16:00	J
		40	01:40				5	25	32:00	L
		50	01:40				15	31	48:00	N
		60	01:30			2	22	45	71:00	O
		70	01:30			9	23	55	89:00	O
		80	01:30			15	27	63	107:00	Z
		90	01:30			19	37	74	132:00	Z
	100	01:30		23	45	80		150:00	Z	
130	39	10						0	02:10	*
		15	02:00					1	03:10	F
		20	02:00					4	06:10	H
		25	02:00					10	12:10	J
		30	01:50				3	18	23:10	M
		40	01:50				10	25	37:10	N
		50	01:40			3	21	37	63:10	O
		60	01:40			9	23	52	86:10	Z
		70	01:40			16	24	61	103:10	Z
		80	01:30			3	19	35	72	131:10
90	01:30			8	19	45	80	154:10	Z	
140	42	10						0	02:20	*
		15	02:10					2	04:20	G
		20	02:10					6	08:20	I
		25	02:00				2	14	18:20	J
		30	02:00				5	21	28:20	K
		40	01:50			2	16	26	46:20	N
		50	01:50			6	24	44	76:20	O



Cálculos de Autonomía

Estos cálculos son fundamentales a la hora de la planificación de un buceo. Se realizan aplicando la siguiente fórmula

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Nº de botellones x volumen del cilindro x (p. Manométrica – p. de reserva)}}{\text{Consumo x Presión absoluta}}$$

Unidades:
Autonomía: minutos
Volumen del cilindro: Litros o pies cúbicos
Presión manométrica y de reserva: ata, bar, kg/cm2 o libras por pulgada cuadrada
Consumo: litros por minuto

Observaciones importantes:

-El volumen del cilindro se mide desde el interior, lo mejor es preguntarle al Dive Master o al proveedor. Los comunes cargan 11 litros de aire a una atmósfera.

-La presión de reserva puede variar desde 50 ata (buceos convencionales) hasta el tercio de la manométrica (buceos en cavernas y espacios restringidos).

-El consumo varía de acuerdo a la actividad, temperatura, capacidad pulmonar, sexo, edad, etc. Generalizando se podría decir que en superficie una actividad moderada consume 18 lts/min, una moderada entre 22 y 24 lts/min y una esforzada o una a baja temperatura 28 lts/min. La experiencia nos dice que el consumo es personal y uno podrá establecerlo con la sucesión de buceos a través de cálculos de autonomía retrospectivos.

-Recordar que la presión absoluta se compone de relativa y atmosférica (y esta última no siempre es 1!!!, como en el buceo en altura).

Ejemplos:

¿Qué autonomía tendremos con un tanque de 11 litros cargado a 200 ata si buceamos en agua templada, con trabajo liviano a 15 metros de profundidad en el mar?

$$\text{Autonomía} = \frac{1 \times 11 \text{ litros} \times (200 \text{ ata} - 50 \text{ ata})}{18 \text{ litros} / \text{minuto} \times 2,5 \text{ ata}} = 37 \text{ minutos}$$

Si al finalizar un buceo en aguas frías a 20 metros, 25 minutos, vemos que la presión manométrica es de 50 kg/cm2, habiendo comenzado con 200 kg/cm2, ¿podemos decir que tenemos un buen consumo de aire?

$$\frac{1 \times 11 \text{ litros} \times (200 \text{ ata} - 50 \text{ ata})}{\text{x litros/minuto} \times 3 \text{ ata}} = 25'$$

$$\frac{1 \times 11 \text{ litros} \times (200 \text{ ata} - 50 \text{ ata})}{25 \text{ minutos} \times 3 \text{ ata}} = \mathbf{22 \text{ lts/min}}$$

