

# ¿Puede ser, simplemente, por metabolismo? Un nuevo modelo para explicar la variabilidad 'burbujeante'

El riesgo de enfermedad por descompresión (ED) después de una inmersión, ha sido atribuido a la presencia de burbujas de gas, llamadas "émbolos de gas vascular" (EGV), que circulan por la sangre. Se cree que se desarrollan a partir de precursores en forma de "micronúcleos de gas", originados como resultado de una supersaturación de gas. Recientemente, la ED también ha sido asociada a la [presencia de micropartículas en la sangre y síntomas asociados a un proceso inflamatorio](#).

Las burbujas EGV posteriores a la inmersión se pueden medir con un Doppler y con ecocardiografía, y se han utilizado como una indicación del esfuerzo descompresivo, aunque los EGV pueden estar presentes sin dar lugar a una ED. Para una inmersión determinada, el monitoreo de los EGV [muestra una amplia variedad entre los diferentes individuos, sugiriendo el papel que juega la susceptibilidad individual](#). De hecho, los investigadores han observado que ciertas personas son propensas a generar burbujas y desarrollar una ED, mientras que otras parecían no estar afectadas. Por el contrario, el mismo buceador puede exhibir variaciones en los EGV en una misma inmersión, que pueden verse influenciados por el acondicionamiento previo a la inmersión. Ninguno de estas variaciones pueden ser explicadas por los actuales modelos de descompresión.

De hecho, en un [nuevo artículo](#) extraído de trascendentes investigaciones sobre estudios realizados en las últimas décadas, los investigadores de DAN Europe proponen que los procesos metabólicos individuales de un buceador pueden originar una "variabilidad burbujeante", lo que puede desembocar en una ED. Su nuevo modelo explica tanto la variación individual como las diferencias observadas en el acondicionamiento previo a la inmersión, y arroja luz sobre el origen de las micropartículas en la sangre. También explica la variabilidad observada en los EGV en función de la edad, la aptitud física y el estrés por inmersión, que fueron identificados como riesgos clave.



## Voy a generar burbujas para siempre

El modelo metabólico de los autores se basa en el trabajo pionero de Brian Hills sobre la cavitación de las burbujas, y [más recientemente](#), en el del investigador israelí Ran Arieli, quien demostró que las burbujas de descompresión del buceador sólo pueden desarrollarse a partir de micronúcleos de gas preexistentes, que aparecen en puntos hidrofóbicos activos, localizados en el revestimiento interno de los vasos sanguíneos.

El segundo fundamento del modelo es la sorprendente investigación llevada a cabo en la última década sobre el [preacondicionamiento del buceador](#), que ha confirmado que las nanoburbujas estables y estacionarias probablemente ya están presentes en los buceadores, en la superficie, antes de la inmersión.

La hipótesis de los autores es que el metabolismo de un buceador es responsable de crear una población de pequeñas bolsas de gas, denominadas "Burbujas Metabólicas Estáticas", o BME, que están unidas a los revestimientos de los vasos sanguíneos, antes de la inmersión. Estos nanocontenedores de gas, a su vez, actúan como precursores de la circulación de los EGV, después de la inmersión.

Los autores postulan que la formación de las BME son fruto de la conocida "Ventana de Oxígeno" (VO), es decir, la diferencia de presión parcial entre el oxígeno alveolar del buceador, que está en equilibrio con la presión ambiental, y la presión parcial del oxígeno tisular, más baja debido al metabolismo activo. Proponen que este gradiente de presión sustenta a una población de bolsas de gas BME cuando el buceador está en la superficie —cuanto mayor sea el gradiente, más BME creadas— y ofrecen una ecuación matemática que caracteriza su forma, su volumen y su dinámica.

Durante el descenso, los volúmenes de las BME se reducen de acuerdo con la ley de Boyle-Mariotte. Sin

embargo, una vez que el buceador entra en un estado de descompresión, el intercambio de gas alimenta a las BME existentes, mediante la difusión desde el tejido adyacente. Las BME crecerán hasta alcanzar el volumen crítico para el desprendimiento de burbujas de los revestimientos de los vasos sanguíneos y generar las burbujas.

Por lo tanto, el nivel de EGV dependerá del número de puntos hidrofóbicos en los vasos sanguíneos, del volumen inicial de las BME, que depende del metabolismo del buceador, y de la tasa de ascenso, que creará los gradientes de difusión, y regirá la velocidad a la que las BME crecerán y producirán EGV. Además, cuando las BME se separan del revestimiento de los vasos sanguíneos, se cree que rompen las micropartículas, que luego pueden pasar a través de los filtros pulmonares y cardíacos y provocar una respuesta inflamatoria, la otra cara de la ED.



## Entendiendo la Variabilidad y el Preacondicionamiento

Según el modelo, la población de BME preexistente representa la característica individual principal del buceador, que definirá su nivel de EGV después de la inmersión, así como la inflamación, y podría explicar la variabilidad en la generación de burbujas observado entre los buceadores. Se sabe que el metabolismo disminuye con la edad, por lo que esto también podría explicar mayores índices de EGV en buceadores de más edad.

Del mismo modo, se sabe que el metabolismo está linealmente relacionado con la frecuencia cardíaca en reposo, y su registro proporcional al de la masa corporal. Esto sugiere que el *fitness* aumenta la VO. En consecuencia, esto explicaría niveles más bajos de EGV en buceadores en buena forma física. Curiosamente, en el análisis de la base de datos de buceo del DSL, los investigadores de DAN concluyeron que únicamente dos factores, como son el aumento de la edad y el índice de masa corporal, podrían estar relacionados con el aumento de la formación de burbujas.

El modelo también proporciona información sobre el reciente trabajo acerca del preacondicionamiento de los buceadores, que demostró que las vibraciones mecánicas, así como el oxígeno pre-respirado, reducen los EGV después de la descompresión. Estas acciones probablemente desprenderían y reducirían el volumen de las BME antes de la inmersión, lo que resultaría en menos EGV. Del mismo modo, el modelo es consistente con estudios que muestran cómo el largo reposo en cama destinado a simular la microgravedad durante los viajes espaciales, seguido de inmersiones con aire, muestran un significativo aumento del número de burbujas después de la descompresión.



## ¿Algoritmos metabólicos de Descompresión?

Aunque la relación entre los EGV y el riesgo de ED no es directa, cuanto menor sea el recuento de burbujas, menor será el riesgo de ED. Los autores concluyen que la cantidad de EGV entrantes y la capacidad de filtración pulmonar, determinan la posibilidad de aparición de burbujas arteriales y, por lo tanto, de ED. Como se ha comentado, el desprendimiento de burbujas venosas también puede crear micropartículas, lo que puede provocar una inflamación del tejido, similar a la causada por las burbujas.

Según los autores, para establecer niveles aceptables de riesgo de ED basados en futuros algoritmos de descompresión, requerirá estimar varios parámetros que tengan en cuenta las características individuales del buceador. También puede ser posible complementar los valores M y los factores de gradiente para algoritmos existentes, basados en estas características.

Cabe señalar que los nuevos algoritmos basados en características individuales del buceador, no necesariamente producirán perfiles de descompresión muy diferentes de los actuales, que ya proporcionan un nivel aceptable de riesgo. Sin embargo, un nuevo modelo basado en el metabolismo podría proporcionar un mejor control del conservadurismo y ofrecer a los buceadores la posibilidad de seleccionar el nivel de estrés descompresivo que están preparados para aceptar, para una inmersión dada.

---

### Sobre el autor

Michael es un galardonado periodista y tecnólogo que ha escrito sobre buceo y tecnología del buceo, durante décadas. Acuñó el término "buceo técnico". Su trabajo ha aparecido en revistas como Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED y X-Ray. Fundó y ejerció como editor en jefe de aquaCORPS, lo que ayudó a convertir la tecnología en la corriente principal del buceo deportivo. También organizó las primeras conferencias Tek, EuroTek y AsiaTek.