



Un rasgo de los seres vivos que nunca deja de sorprender es su capacidad de adaptarse a ambientes inhóspitos como los lagos “anóxicos”, las zonas pantanosas, el fondo marino o a cuevas casi sin oxígeno ni luz solar. Estas adaptaciones pueden variar en intensidad, desde el comportamiento de los organismos hasta la modificación de su anatomía y fisiología. Su estudio sigue siendo un vasto campo a explorar.

Aunque existen diversas teorías basadas en el conocimiento científico, el conocimiento empírico, social y cultural también puede inspirar y servir de guía para entender el origen y los cambios que han sufrido los ambientes y sus organismos a lo largo del tiempo. Asimismo, el avance mutuo y estrechamente vinculado de la ciencia y la tecnología ha aumentado las posibilidades de estudio en diversos campos. Es así que los biólogos, químicos, geólogos, ecólogos, genetistas, entre otros, se han dedicado a estudiar los procesos que propician las adaptaciones y la respuesta de los organismos ante la presión del ambiente.

Así como las Islas Galápagos avivaron la curiosidad de Charles Darwin para iniciar sus investigaciones sobre el origen de los seres vivos y de sus adaptaciones, también los investigadores de hoy se cuestionan sobre cómo es que ciertos organismos habitan en ambientes tan peculiares, como las cuevas anquialinas. Si bien son conocidas las cuevas terrestres y las marinas, las anquialinas, también llamadas cuevas intermedias, son un descubrimiento reciente, ya que hace apenas cincuenta años que el zoólogo austriaco Rupert Riedl inició los estudios faunísticos en tales sitios.

Una cueva es una cavidad natural formada en un terreno rocoso; las anquialinas son peculiares por el ecosistema que se encuentra en ellas, el cual está parcial o totalmente inundado, tanto por agua continental como por marina. Por lo tanto son costeras y se ubican debajo del nivel del suelo,



Diana M. Hernández y Elisa Arellano Torres



Las cuevas **anquialinas**



ya sea en la zona continental o la marina. Son descritas como sistemas dinámicos e intermedios de amortiguamiento (“estuarios” subterráneos) entre el continente y el océano, y el nivel de contribución de cada ambiente varía en función de la distancia a la que éste se encuentra de la costa. Existe un flujo de agua continental hacia la costa por medio de conexiones subterráneas que se comunican con el océano y un flujo de entrada de agua oceánica hacia la cueva. Debido a que este flujo ocurre a través de cavidades en la roca, el proceso de intercambio es considerado lento, por ello el agua oceánica puede llegar a permanecer en la cueva durante meses e incluso años.

Dentro de la cueva se presenta entonces la coexistencia de dos capas de agua: una que puede ser salobre o continental, y que está sobre otra, de agua oceánica. Debido a la significativa diferencia de densidad entre ambas capas provocada por las distintas salinidades, se favorece la formación de estratos, fenómeno que es incrementado por el aislamiento geológico de estas cuevas y el limitado forzamiento del viento que fomentaría la mezcla de los cuerpos de agua.

De acuerdo con la profundidad de la caverna existen variaciones en las propiedades físicas y químicas del agua que, cuando son bruscos, en distancias cortas, reciben el nombre de “clinias”. Cuando esto ocurre en la salinidad del agua se denomina haloclina, y se puede presentar no sólo una, sino varias.

Las entradas de la cueva son de poco tamaño en comparación con su dimensión total, lo cual genera, además del aislamiento geológico característico de su ambiente, una

gran limitación en la cantidad de luz que ingresa, por lo que usualmente existe escasa o nula actividad fotosintética. Esto provoca también que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua sea mínimo, lo que hace de la cueva un ambiente “hipóxico”, es decir, que presenta un bajo contenido de oxígeno disuelto e incluso sin oxígeno disuelto, esto es “anóxico”.

Por otro lado, algo poco conocido es que las formaciones geológicas que constituyen las cuevas anquialinas son de origen diverso, no sólo “cárstico” (de roca caliza), y menos aún se conoce de su dispersión en la superficie terrestre, ya que resulta difícil restringir la ubicación de este tipo de cuevas a una región específica; se puede decir que, aproximadamente, entre las latitudes del Trópico de Capricornio al sur y el Círculo Polar Ártico al norte.

Entre las cuevas más estudiadas se encuentran las localizadas en terreno cárstico, como los cenotes de Yucatán, los *blue holes* (literalmente traducidos como hoyos azules) ubicados en las costas de Belice, los archipiélagos de las Bahamas y las Islas Bermudas, y otras en el mar Caribe y el Mediterráneo y, de menor tamaño, en el Pacífico Indo-Sur y el oeste de Australia. No obstante, en años recientes también se ha estudiado cuevas anquialinas de origen volcánico, algunas en forma de tubos huecos de lava, formados a partir de erupciones de la corteza oceánica (de composición basáltica) o bien como fallas o grietas verticales de la corteza continental (de composición granítica o silicatada). Se ha observado que se extienden bajo el nivel del mar, tanto al interior del continente como en el océano, en lugares como las islas Galápagos y las Hawaianas en el Pacífico cen-

tral, la isla Lanzarote de las Canarias en el Atlántico este y en la península del Sinaí, Egipto.

Una peculiaridad más de las cuevas anquialinas es la formación de nubes de ácido sulfhídrico (H₂S), que generalmente se presentan en cenotes y *blue holes* debido a la degradación de materia orgánica, y que se ubican a una profundidad justo por debajo de la haloclina, reduciendo la visibilidad hasta hacerla nula.

La vida en ellas

A lo largo de la historia, a las cuevas anquialinas se les ha atribuido diversas interpretaciones místicas, pues suelen ser consideradas como una entrada al inframundo y, aunque los organismos que se encuentran en este ambiente son principalmente bacterias, invertebrados (crustáceos), y vertebrados pequeños (anfibios y peces), no por eso éstas son menos interesantes que si realmente encerrarán místicos secretos. En ellas se halla principalmente fauna endémica y totalmente restringida a dicho hábitat, denominada “estigofauna”, la cual puede llegar a habitar aguas contiguas, ya sea mayormente marinas o mayormente continentales, haciendo imprecisos los límites del ecosistema. También se ha observado organismos “ubicuos”, que sobreviven tanto dentro como fuera de la cueva, y algunos organismos accidentales que son llevados por corrientes de marea pero que no sobreviven en el ambiente cavernícola.

Como se mencionó al inicio, los organismos de cualquier ambiente pueden adaptarse a condiciones extremas y restringidas si su genética, conducta y fisiología lo permite. Las cuevas anquialinas proporcionan claros ejemplos de la capacidad de adaptación de sus organismos. Entre las características principales de los seres “estigobios” se puede enumerar cinco: 1) son ciegos o de vista débil debido a la pérdida o el atrofio de los órganos oculares; 2) presentan falta de pigmentación o semitransparencia; 3) usualmente son de tamaño pequeño, de unos cuantos micrómetros a unos pocos centímetros; 4) se agrupan en poblaciones pequeñas; y 5) no hay cambios sustanciales en su actividad biológica al no existir diferencia en el día y la noche debido a la limitada entrada de luz a la cueva.

Origen de la fauna anquialina

Es un hecho que los habitantes más abundantes y diversos de las cuevas anquialinas son los crustáceos y el estudio de su origen y evolución es de gran interés. En una cueva an-

quialina de las Bahamas, por ejemplo, existe una clase nombrada *Remipedia*, descrita en 1981 por la zoóloga y ecóloga Jill Yager, compuesta por especies muy primitivas que pueden considerarse coloquialmente como fósiles vivientes, es decir, especies aisladas que han evolucionado en un largo periodo de tiempo; incluso se considera que su linaje procede del antiguo y desaparecido mar de Tetis, que existió en la era Mesozoica cuando Pangea se dividió en Gondwana y Laurasia hace aproximadamente 250 millones de años. Ello podría explicar parcialmente el hecho de que los organismos de esta clase se encuentren distribuidos en cuevas alrededor del mundo sin aparente conexión geográfica.

No obstante, existen otras teorías que intentan dar una explicación más general. En publicaciones recientes de tres de los investigadores más renombrados en este campo, Thomas M. Iliffe, Renée E. Bishop y Louis S. Kornicker, se menciona el archipiélago de las Bahamas como el centro de origen de la fauna anquialina debido a la alta cantidad de especies estigobias que habitan en sus cuevas. Se ha propuesto la posibilidad de que tales especies hayan usado cuevas más antiguas y pequeñas como protección en épocas glaciares, pero también se ha sospechado que los ancestros de tales organismos pudieron haber sido bentónicos (asociados al fondo marino) y que se hallaban en aguas superficiales próximas



a la cueva o que pudieron ser transportados desde cuevas cercanas y más antiguas.

Los dispersos patrones biogeográficos que muestran los habitantes de las cuevas anquialinas han despertado la curiosidad de quienes los investigan, por lo que se han propuesto hipótesis sobre su origen y las rutas de colonización, esencialmente de crustáceos. Entre las principales, todas con evidencias que las apoyan y con posibles contraargumentos que las podrían descartar, se destacan las siguientes: la primera hipótesis, la más mencionada, es la de “vicarianza”, según la cual, a partir del desplazamiento de las placas tectónicas de Pangea, las especies quedaron separadas y favorecieron la distribución de la fauna Tetiana. Sin embargo, dicha teoría no explica la existencia de las comunidades anquialinas en las islas Bermudas, Asunción y Hawaianas, que son de formación geológica reciente y no pertenecen al antiguo continente.

La segunda es la del “origen en mar profundo”, que considera las similitudes entre los organismos de las cuevas anquialinas y los que habitan en las profundidades oceánicas, ya que las condiciones de ambos ambientes parecen bastante similares. Se piensa que había túneles que conectaban el mar profundo con las cuevas anquialinas, pero se

duda que los organismos hayan sido capaces de cruzar verticalmente el océano y soportar los cambios bruscos inherentes a él. Al respecto se han publicado análisis filogenéticos que sugieren la existencia de conexiones subterráneas entre al menos tres cuevas de las Bermudas y otras de Yucatán, observándose fauna muy similar en cuevas que se encuentran a gran distancia. Esto podría apoyar la idea de que hubo conexiones entre el océano profundo y las cuevas; sin embargo, se han realizado análisis filogenéticos que demuestran que el océano profundo y las cuevas anquialinas fueron colonizados por separado. Aunque aún no se sabe si esta hipótesis es correcta, algunos pueden llegar a considerar las especies estigobíticas como un eslabón intermedio en la evolución de la fauna oceánica antigua y la actual.

La tercera propone una “regresión”, esto es que las especies quedaron atrapadas en las cuevas cuando el nivel del mar disminuyó durante las glaciaciones o bien por el levantamiento geológico de la zona en que se encontraba la cueva, donde posteriormente las especies que se adaptaron al ambiente dieron origen a la fauna anquialina. Esto se apoya en la coincidencia de los patrones geológicos y las antiguas líneas de costa del Mesozoico, pero nuevamente se presenta un problema en cuanto a las Bermudas, que no muestran cambios importantes en sus líneas de costa por ser islas de formación reciente.

Del mismo modo, aparecen otras contrariedades al pensar en las islas de poco tamaño y en las cuevas anquialinas con estalactitas o estalagmitas relativamente recientes (menos de 10 000 años). Estas últimas son formaciones que necesariamente requieren un ambiente aéreo para producirse, lo que implicaría que los organismos tuvieron que migrar verticalmente para colonizar las cuevas cuando éstas se llenaron de agua, lo que implica nuevamente la problemática de la capacidad de los organismos para soportar cambios tan abruptos al realizar el trayecto.

La cuarta y la quinta hipótesis son un tanto similares, pues ambas implican la inmigración de los organismos a dichas cuevas. La primera se refiere a la invasión del hábitat por especies oportunistas con altos límites de tolerancia fisiológica que lograron adaptarse al agua continental o salobre y es llamada “migración activa”. La segunda es la de “migración pasiva” y se explica por medio de la llegada de organismos en estados larvarios o postlarvarios acarreados por corrientes marinas u objetos flotantes, lo cual sería posible en distancias cortas pero difícil en los organismos con baja tolerancia fisiológica y poca descendencia que actualmente habitan en tales cuevas.





Un caso que apoyaría la hipótesis migratoria, ya sea activa o pasiva, es el de algunos camarones de las cavernas de Yucatán, en donde por la formación de las cuevas durante el Plioceno (entre uno y dos millones de años atrás) y dado que se sabe que la fauna divergió antes de ese tiempo, se estima que cada especie debió habitar en cavidades marinas y posteriormente colonizar el hábitat por separado. En cuanto al caso del mar Caribe, se sugiere que un ancestro marino colonizó las Bahamas y luego fue llevada a las Bermudas por corrientes, por lo que tales organismos evolucionaron por separado o bien el ancestro marino que colonizó las Bahamas adquirió características estigobias, dando paso a una nueva especie que posteriormente colonizó las Bermudas.

Ante tal cantidad de hipótesis, es claro que son necesarios más estudios, principalmente de genética molecular para poder determinar la edad y secuencia de dispersión de la fauna anquialina y con ello sustentar o postular nuevas hipótesis sobre su origen, así como de fechamiento geológico que nos permitan determinar la edad de las cuevas anquialinas consideradas de formación antigua con base en el estudio de especies primitivas, como los remipedios.

Conviene destacar que conforme se ha ampliado el conocimiento sobre las cuevas anquialinas se ha modificado no sólo su denominación sino el significado de ésta. En 1966, Rupert Riedl las llamó "cuevas marginales" (del alemán *Randhöhlen*); siete años después se le asignó el término "anquialino" (del griego ἄλγος, cercano al mar), variando con

el término "anquihalino" (del griego *halino*, de sal), y fue el primero el más aceptado por los expertos. Las investigaciones permitieron que en 1986 el concepto se ampliara para incluir los nuevos descubrimientos sobre procesos biológicos y ecológicos. Durante los 27 años siguientes, y de acuerdo a una revisión hecha por Renée Bishop y sus colaboradores, se han publicado aproximadamente 850 artículos científicos que refieren al ecosistema, y en el II Simposio Internacional del Ecosistema Anquialino se propuso redefinirlas como un "estuario subterráneo".

A manera de conclusión

Se puede decir que el conocimiento del origen de estos organismos nos acerca a entender mejor los procesos de adaptación en ambientes extremos mediante los distintos eventos de la evolución del planeta. Las cuevas anquialinas son también una excelente zona de estudio, ya que al hallarse geológicamente aisladas se puede tener mayor control sobre los límites a investigar, en comparación con una estepa o una zona marina, por poner ejemplos.

Además de las características ya descritas, las cavidades naturales relacionadas con las cuevas anquialinas desempeñan un importante papel en el ciclo hidrológico, ya que se relacionan estrechamente con los mantos acuíferos subterráneos de agua continental, lo que las hace aún más importantes, sobre todo en regiones en donde los ríos super-

ficiales son muy pocos y las poblaciones humanas se ven beneficiadas por la extracción de agua subterránea para su supervivencia.

Tal y como lo mencionaron Salazar Vallejo y sus colaboradores en 1993, para preservar acuíferos subterráneos como los presentes en los estados de Quintana Roo y Yucatán, debemos: 1) aprender a regular los asentamientos humanos alrededor de cenotes y caletas; 2) definir el uso de estos cuerpos de agua con estudios científicos que aclaren su papel en la cuenca subterránea; y 3) instalar plantas de tratamiento

de agua e infraestructura para el reciclamiento de los desechos urbanos e industriales que aseguren la óptima calidad del ecosistema y de sus recursos.

Las cuevas anquialinas permiten conocer más acerca de la evolución de un importante número de organismos especializados y de sus estrategias para sobrevivir en determinados ambientes; además, la conservación de tales ecosistemas es de gran importancia para el mantenimiento a nivel mundial de sus especies endémicas y para el bienestar mismo de la humanidad. ●



Diana Guadalupe Morales Hernández

Estudiante de licenciatura en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias,

Elsa Arellano Torres

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Bibriescia Contreras, G., F. A. Solís Marín. 2014. *Las cuevas anquialinas: laboratorios de la naturaleza*. Colección Posgrado, UNAM, México.

Bishop, R. E. et al. 2015. "Anchialine' redefined as a subterranean estuary in a crevicular or cavernous geological setting", en *Journal of Crustacean Biology*, pp. 1-4.

Calderón Gutiérrez, F. 2014. "El mundo secreto en Cozumel", en *Biodiversitas*, núm. 11, pp. 3-5.

Iliffe, T. M. y L. S. Kornicker. 2009. "Worldwide Diving Discoveries of Living Fossil Animals from the Depths of Anchialine and Marine Caves", en *Proceedings of the Smithsonian Marine Science Symposium*, núm. 38, pp. 269-280.

Iliffe, T. M., H. Wilkens, J. Parzefall y D. Williams. 1984. "Marine Lava Cave Fauna: Composition, Biogeography, and Origins", en *Science*, núm. 225, pp. 309-311.

Salazar Vallejo, S. I. y González, N. E. 1993. "Panorama y fundamentos para un programa nacional", en *Biodiversidad marina y costera de México*, pp. 6-38.

Suárez Morales, E. y E. Rivera Arriaga. 1998. "Biología y Fauna Acuática de los Cenotes de la Península de Yucatán", en *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, núm. 48, pp. 37-47.

Torres Talamante, O., E. Escobar, P. A. Beddows y J. Yager. 2008. "Performing Multiprobe Profiles and Hydrographic Description of the Water column in an Anchialine Cave in Quintana Roo", en *Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences 27th Symposium*, pp. 177-186

IMÁGENES

P. 30: Jay Ripley. P. 31: Pony Reinhardt. P. 32: Denise Machado; Manu Collado. P. 33: Gwan Soon Lee. P. 34: Noir Boréal. P. 35: Conon; Chris Davis; Joe Bostick.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, F., E. Escobar Briones y J. Alcocer, 2000. "Sistemas anquialinos en México", en *Ciencia y Desarrollo*, núm. 15, vol. 26, pp. 37-45.

POLYGENETIC CAVES

Palabras clave. Cuevas anquialinas, fauna estigobia, conexión continente-oceano, cenotes, estuario subterráneo.

Key words. Anchialine caves, stigobitic fauna, continent-ocean connection, cenotes, subterranean estuary.

Resumen. Las cuevas anquialinas son cuevas intermedias entre el océano y el continente, que funcionan como estuarios subterráneos. Las habitan organismos que se han adaptado a condiciones extremas y existen hipótesis que explican la colonización que dio inicio a la fauna anquialina.

Abstract. Anchialine caves are intermediate caves connecting the sea and the land, working like subterranean estuaries. The inhabitant organisms have adapted to the extreme conditions, and there exist hypothesis explaining their colonization and the establishment of the anchialine fauna.

Diana M. Hernández. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Estudiante de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Elsa Arellano Torres Profesora de Carrera (Asociado C) de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Bióloga, tiene Doctorado en Oceanografía Maestría en Ciencias del Mar y Limnología. Es miembro SNI I.

Recibido el 30 septiembre 2017; aceptado el 10 agosto 2018.