



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: junio 7, 2024

Revisión recibida: Noviembre 12, 2024

Aceptado: Noviembre 13, 2024

*Research article*

# Estigobiota microscópica de un río subterráneo amazónico de aguas negras, cueva del Tepuy Yará, Caquetá, Colombia

Microscopic stygobiota of an Amazonian blackwater ground-water river, Tepuy Yará Cave, Caquetá, Colombia

Henry Gallo-Martínez<sup>1,4</sup>✉, Oscar Barbosa-Trujillo<sup>1,5</sup>✉, Francesco Sauro<sup>2</sup>✉, Carlos A. Lasso<sup>3,4</sup>✉,

<sup>1</sup>Universidad El Bosque, Programa de Biología, Laboratorio de Ictiología y Embriología, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>La Venta Esplorazioni Geografiche APS, Treviso, Italia.

<sup>3</sup>Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia

<sup>4</sup>Asociación Espeleológica Colombiana (Espeleocol), Bogotá, Colombia

<sup>5</sup>Universidad El Bosque, Programa de Biología, Grupo de Investigación en Biología (GRIB), Bogotá, Colombia

## RESUMEN

Se estudió la estigobiota microscópica en un río cavernícola de aguas negras en las selvas del Yará, Caquetá. Los muestreos se realizaron en la sección hipogea del río de una cueva de cuarzo-arenita, incluyendo la sección lótica (cauce) y léntica (poza interconectada) del río, mediante el filtrado de 100 L de agua con una red de zooplancton de 23 µm. Se hicieron análisis cuantitativos utilizando estimadores de biodiversidad alfa. Se registró una mayor abundancia, diversidad y riqueza de organismos en el sistema léntico (quince especies y cuatro morfoespecies, agrupadas en siete phylum, diez clases, once órdenes y quince familias), con relación al sistema lótico (seis especies y dos morfoespecies, de cinco phylum, seis clases, siete órdenes y siete familias), para un total de quince especies y cinco morfoespecies en los dos sistemas, agrupados en siete phylum, diez clases, once órdenes y quince familias. Los organismos identificados forman parte de grupos conocidos como tecamebas, rotíferos, copépodos, ácaros, algas pardas, algas verdes y diatomeas, indicando que la ausencia de luz no es un factor limitante para la distribución de estos microorganismos, ya que no son estrictos en estos tipos de hábitats. Es posible que los organismos que lleguen a esta sección de la cueva sean arrastrados por medio de corrientes epigeas y aguas de percolación, formando poblaciones estables, siendo esta una evidencia de intercambio biótico entre ambos sistemas (hipogeo-epigeo). Para la ecología microscópica de estas comunidades es el primer estudio de este tipo en la Amazonia colombiana.

Palabras clave: Agua subterránea, hipogeo, epigeo, nutrientes, tecamebas, microorganismos.

## ABSTRACT

Microscopic stygobiota were studied in a blackwater cave river in the Yará forests, Caquetá. Sampling was carried out in the hypogean section of the river from a quartz-arenite cave, including the lotic (riverbed) and lentic (interconnected pool) sections of the river, by filtering 100 L of water with a 22-micron zooplankton net. Quantitative analyses were performed using alpha biodiversity estimators. A higher abundance, diversity and richness of organisms were recorded in the lentic system (15 species and 4 morphospecies, grouped in 7 phylum, 10 classes, 11 orders and 15 families), in relation to the lotic system (6 species and 2 morphospecies, from 5 phylum, 6 classes, 7 orders and 7 families), for a total of 15 species and 5 morphospecies in the two systems, grouped in 7 phylum, 10 classes, 11 orders and 15 families. The organisms identified are part of groups known as testate amoebae, rotifers, copepods, mites, brown algae, green algae and diatoms, indicating that the absence of light is not a limiting factor for the distribution of these microorganisms, as they are not strict in these types of habitats. It is possible that the organisms that reach this section of the cave are carried by epigean currents and percolation waters, forming stable populations, which is evidence of biotic exchange between both systems (hypogean-epigeum). For the microscopic ecology of these communities, this is the first study of this type in the Colombian Amazon.

Keywords: Groundwater, hypogean, epigeum, nutrients, testate amoebae, microorganisms.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estigofauna (Stygofauna) hace referencia a todos los organismos invertebrados acuáticos subterráneos, los cuales viven entre los espacios de arena del sedimento de las capas freáticas de los ríos epigeos e hipogeos, arroyos, charcos, lagos y acuíferos (Camacho y Valdecasas, 2006).

El presente estudio se refiere específicamente a la estigobiota microscópica de una cueva amazónica asociados a un río de aguas negras. Estos microorganismos incluyen grandes grupos como protozoos, nemátodos, microcrustáceos, hongos, bacterias e inclusive algas.

Se encuentran tanto en las aguas superficiales como las más profundas y la presencia de estos organismos puede ser considerada ocasional, accidental o frecuente según las características geográficas y época del año (Camacho y Valdecasas, 2006). Sin embargo, algunos de estos microorganismos tienen la capacidad de formar poblaciones estables dentro de estos ecosistemas, realizando funciones vitales como alimentación y e incluso reproducción.

Las aguas subterráneas son usualmente el producto de escorrentía e infiltración por agua lluvia en las cavernas y el suelo, en las cuevas kársticas el proceso de disolución de las rocas hace que se libere el CO<sub>2</sub> volviendo el agua ligeramente más ácida (Hancock y Boulton, 2008; Baković *et al.*, 2022), pero también hay muchos ríos cavernícolas de origen hipogeo endorreico (aislados del exterior), epigeos (superficiales) o una combinación de ambos (Lasso obs. pers.).

Estas desempeñan un papel importante en el transporte de materia orgánica y energía entre los ecosistemas acuáticos epigeos e hipogeos, proporcionando un hábitat vital para muchos microorganismos y macroorganismos, en particular los estigobiontes estrictos. Por otra parte, en las cavernas están los microorganismos que derivan del medio epigeo y son considerados accidentales y ocasionales, este es el caso de las amebas, rotíferos, nematodos y ciliados, entre otros (Di Lorenzo y Sartori 2007).

Estos organismos ayudan en el ciclo del carbono y de los nutrientes, así como en la eliminación de patógenos en el agua (Saccò *et al.*, 2022). Contribuyendo a la biodegradación de compuestos orgánicos e inorgánicos en aguas subterráneas, de esta forma facilitando la descomposición y reciclaje de la materia orgánica (Culver y Pipan, 2013). Además, estos organismos son fundamentales para sentar las bases de una compleja red trófica, en donde el flujo de energía proviene principalmente de hongos y bacterias, los cuales sirven de alimento a la estigobiota microscópica, de esta forma los protozoos son una fuente de alimento para copépodos y larvas de insectos, que a su vez son presas clave para los peces que habitan en los sistemas subterráneos.

El objetivo de este estudio es conocer la diversidad y abundancia de la estigobiota asociada a un río subterráneo de aguas negras en la Amazonia colombiana, partiendo del hecho de que en Colombia no existen antecedentes de estos estudios en la Amazonia.

### 1.1 Área de estudio y Localización

La cueva Necaeridagoda (nombre Uitoto) o Cueva de Los Sueños, se encuentra en el departamento del Caquetá a unos 3,4 km al norte del río Yari (S 0.179537° W 72.534469°), en la Amazonia colombiana (Fig. 1). Tiene una extensión de 625 m y la poza estaba situada a unos 100 m de la entrada.

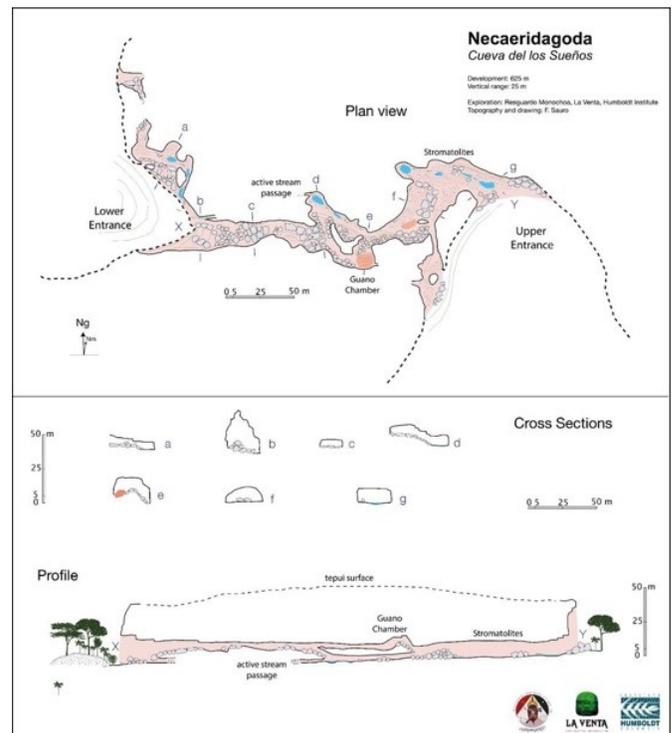


Fig. 1. Arriba: Vista por satélite de las cuevas, derrumbes y acantilados tepuy de Yari; abajo: Mapa de la cueva de Necaeridagoda. Fuente: Sauro y Lasso (2023).

## 2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

La cueva estudiada forma parte de la Serranía de Chiribiquete (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2011) y corresponde al Escudo Guayanés en la región del Caquetá colombiano, caracterizado en su base por el Complejo Migmatítico Mitú formado por gneises migmatíticos, gneises graníticos y granitoides, localmente asociados con algunos esquistos micáceos, cuarcitas y anfibolitas. Estas rocas constituyen el basamento geológico de las rocas cristalinas precámbricas de la Amazonia colombiana (Fig. 1).

La deposición sedimentaria en la Serranía de Chiribiquete está relacionada con las rocas de la Formación Araracuara, constituida principalmente por secuencias de cuarzo-arenitas con algunos conglomerados y niveles de areniscas. Esta es la formación de cuarzo-arenita donde se desarrollaron todas las cuevas exploradas. Hay que señalar que, en comparación con otras secuencias cuarzo-sedimentarias depositadas sobre el Escudo Guayanés, la Formación Araracuara se considera mucho más joven en edad, posiblemente formada durante el Ordovícico (Arenigiano), alrededor de 477 a 470 millones de años atrás (Galvis *et al.*, 1979).

Se han realizado muy pocos estudios geológicos sobre Chiribiquete y la similitud con otras areniscas cuarzosas precámbricas del Escudo de Guayana sugiere que podrían proponerse mejores correlaciones de edad. Las razones de las opiniones contradictorias sobre la edad y la correlación de las unidades sedimentarias se deben a que estas rocas se extienden por cinco países y afloran sobre todo en zonas remotas cubiertas por la selva, donde el acceso es difícil y costoso (Sauro y Lasso, 2024).

Las paredes de las cuevas podrían proporcionar secuencias estratigráficas ideales expuestas para el muestreo y la caracterización. A finales del Paleozoico un fallamiento de tipo "horst" (bloque levantado entre dos fallas normales) permitió la aparición de la secuencia precámbrica y paleozoica en la Serranía de Chiribiquete (Sauro y Lasso, 2024) La zona estuvo expuesta a la erosión al menos desde el Jurásico, lo que permitió la formación de morfologías de mesas disectadas como en la región de los tepuyes venezolanos del Escudo de Guayana (Sauro *et al.*, 2013).

Tanto las aguas de la poza de desborde como del río subterráneo son típicamente amazónicas y de color té, ácidas (pH=4,29), de baja conductividad (38/52 micros/cm) y el SiO<sub>2</sub> varió de 1,7 a 1,9 mg/L, respectivamente (Sauro y Lasso, 2024). La poza o charca tenía una forma más o menos circular de unos 2 x 2 m y una profundidad de 30 cm con hojarasca de origen epigeo; estaba en el margen del canal principal del arroyo subterráneo y se formó por su desbordamiento.

## 3. MÉTODO

### 3.1 Trabajo de campo

En la parte interior de la cueva, se tomaron muestras en el sistema léntico (poza de desborde) y en la zona lótica (curso del río subterráneo). En el primer caso, se filtraron 100 L utilizando una red de zooplancton de 23µm. Para la recolecta de muestras en el medio lótico se utilizó una red de zooplancton de 23 µm, la cual se dejó contra corriente durante 24 horas para recoger estigobiota a la deriva. Las muestras se preservaron en etanol 70% (Pineda y Lasso, 2019).

### 3.2 Trabajo de laboratorio

Las muestras fueron analizadas en el Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y en el laboratorio de Ictiología y Embriología de la Universidad El Bosque.

Las botellas se agitaron suavemente para unificar la muestra y evitar el exceso de sedimento en cada gota. Posteriormente, con una pipeta Pasteur se tomó una gota de la muestra, depositándola en un portaobjetos y colocando suavemente un cubreobjetos. De esta forma se realizaron las identificaciones de los organismos hasta llegar al taxón más bajo posible. En paralelo se cuantificó la abundancia de cada taxon por gota revisada, hasta poder llegar a una asíntota en la curva de acumulación, de esta forma el número de especies se estabiliza conforme se agregan más gotas.

La identificación del material se realizó con un microscopio óptico marca ZEISS Axio Lab.A1 con una magnificación de 100x y 400x. Se realizó un registro fotográfico de todos los organismos por medio del programa ZEN 3.9, realizando al mismo tiempo las mediciones para cada taxon. También se utilizó el programa Helicon Focus 8 para realizar un *focus stacking* y de esta forma no perder detalles en la profundidad de los organismos. Para las identificaciones se utilizaron en parte, las guías de identificación de Streble y Krauter (1987), Roldan (1988), Padilla (2023), y la publicación electrónica Microworld, world of amoeboid organisms (Siemensma, acceso mayo 4, 2024).

### 3.3 Análisis estadísticos

Para evaluar la abundancia relativa y riqueza de las especies en los dos sistemas de aguas se realizaron los índices de diversidad de Shannon-Weaver (H) (Moreno, 2000), en donde se calculó el logaritmo natural ln (s) de cada uno, dominancia de Simpson (D), diversidad o inverso de Simpson (D-1) y equidad de Pielou (J') (Moreno, 2000), también se realizó una curva de acumulación de especies y de rarefacción-extrapolación utilizando los números de Hill (q0, q1 y q2) para la biodiversidad alfa. Los análisis se realizaron con los softwares de uso libre Past, EstimateS, Excel y el programa iNEXT.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Composición y diversidad

De manera global (integral), tanto para el sistema léntico (poza) como lóticos (curso del río subterráneo), se identificaron en este caso particular 16 especies y cinco morfoespecies de amebas, ciliados, rotíferos, arácnidos, insectos, copépodos, algas verdes y pardas.

Únicamente para el sistema léntico se lograron identificar un total de 16 especies y cuatro morfoespecies, pertenecientes a siete phylum, diez clases, doce órdenes, catorce familias y catorce

géneros distintos (Tabla 1). Los organismos con mayor número de especies son las amebas, más específicamente las tecamebas, los cuales a pesar de no ser una clasificación taxonómica única y exacta, comparten complejidades anatómicas que hacen que se les otorguen este nombre, donde los pseudópodos (lobopodios y filopodios) están protegidos por tecas en algunos casos de sílice, las cuales son producidas o construidas con diferentes materiales.

En el sistema lótico se encontraron una menor cantidad de organismos, con un registro total de seis especies y dos morfoespecies pertenecientes a cinco phylum, seis clases, siete órdenes, siete familias y seis géneros distintos (Tabla 2).

Tabla 1. Lista de organismos identificados pertenecientes al sistema de agua léntico.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género / Especies
Cercozoa	Imbricatea	Euglyphida	Euglyphidae	<i>Euglypha strigosa</i>
				<i>Euglypha rotunda</i>
			Trinematidae	<i>Trinema</i> sp.
			Centropyxidae	<i>Centropyxis discoides</i>
Amoebozoa	Tubulinea	Arcellinida	Hyalospheniidae	<i>Nebela collaris</i>
				<i>Nebela</i> sp.
				<i>Quadrullella</i> sp.
				<i>Argynnina caudata</i>
			Arcellidae	<i>Arcella</i> sp.
		Lesquereusiidae	<i>Lesquereusia spiralis</i>	
Ciliophora	Spirotrichea	Euplotida	Euplotidae	<i>Euplotes</i> sp.
Rotifera	Eurotatoria	Ploima	Lepadellidae	<i>Colurella</i> sp.
		Bdelloida	Philodinidae	<i>Rotaria</i> sp.
Arthropoda	Euchelicerata	Trombidiformes	-	-
	Copepoda	Harpacticoida	-	-
	Insecta	Coleoptera	Elmidae	-
		Diptera	Chironomidae	-
Ochrophyta	Bacillariophyceae	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia</i> sp.
	Phaeophyceae	Sphacelariales	Sphacelariaceae	<i>Sphacelaria</i> sp.
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Volvocaceae	<i>Pandorina</i> sp.

Tabla 2. Lista de organismos identificados pertenecientes al sistema de agua lótico.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género
Amoebozoa	Tubulinea	Arcellinida	Centropyxidae	<i>Centropyxis discoides</i>
			Hyalospheniidae	<i>Nebela collaris</i>
Rotifera	Eurotatoria	Bdelloida	Philodinidae	<i>Rotaria</i> sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	-	-
		Diptera	Culicidae	-
Ochrophyta	Bacillariophyceae	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia</i> sp.
	Phaeophyceae	Sphacelariales	Sphacelariaceae	<i>Sphacelaria</i> sp.
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Volvocaceae	<i>Pandorina</i> sp.

### 4.2 Abundancia

Los organismos con la mayor abundancia en las muestras pertenecen al orden Arcellinida, siendo los géneros *Centropyxis* sp., *Nebela* sp. y *Arcella* sp., los más representativos dentro del sistema léntico, mientras que otros organismos como las algas, las cuales son consideradas ocasionales y accidentales, tuvieron abundancias altas en el sistema lotico. La mayor riqueza de organismos encontrados pertenece al sistema lótico (Fig. 2).

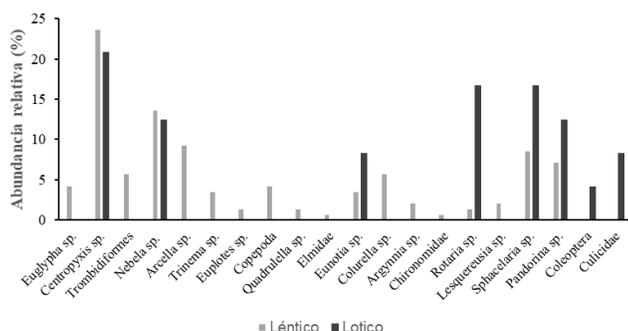


Fig. 2. Riqueza y abundancia relativa (%) de organismos encontrados en los dos sistemas de aguas subterráneas.

En el presente estudio se puede observar un panorama muy diverso en cuanto a las especies asociadas a cuevas de aguas acidas en la Amazonia colombiana, los registros fotográficos son claves para entender las diferencias morfológicas que presentan estos organismos (Fig. 3, Fig. 4).

### 4.3 Índices de diversidad

El índice de diversidad de Shannon-Weaver (H) para el sistema lótico dio un valor de 2,13 y para el sistema lentic el valor fue de 2,64, indicando una alta diversidad de especies, indicando que los dos sistemas presentan una gran probabilidad de seguir

encontrando las mismas especies. El índice de dominancia de Simpson (D) tiene un valor de 0,095 para el sistema léntico y 0,108 para el sistema lótico, los dos valores son cercanos a 0, lo que significa que la muestra no tiene una dominancia marcada por una especie específica y la probabilidad de encontrar organismos de la misma especie es relativamente baja, indicando una alta diversidad y baja abundancia.

Para el índice inverso de Simpson (D-1) o Gini-Simpson, se evalúa la diversidad de las especies; con valores que estén cercanos a 1, el valor para el sistema lotico es de 0,89 y de 0,90 para el sistema léntico, indicando una alta diversidad en la muestra y una alta probabilidad encontrar especies distintas en la misma. El índice de equidad de Pielou (J') de los dos sistemas o macrohábitats, dio un valor cercano a 1, indicando una uniformidad en las abundancias de todos los organismos.

### 4.4 Curva de acumulación y números de Hill

La curva de acumulación de especies alcanzó la asíntota para el sistema léntico con 20 gotas de agua y para el sistema lótico, con 15 gotas de agua. La curva de acumulación indica un muestreo y una proyección de datos bastante similar, donde los datos originales sugieren que se encontraron la mayoría de las especies en las muestras revisadas y la extrapolación de los datos generó una curva de rarefacción, que indica que las gotas revisadas fueron suficientes para estimar la diversidad de las muestras (Fig. 5).

Los números de Hill se graficaron para estimar la riqueza y la biodiversidad alfa de las especies. Estos mostraron una estabilización para cada uno de los números (q0, q1 y q2), por lo que es posible que se hallan encontrado la mayoría de las especies pertenecientes a la cueva. Sin embargo, en las curvas se evidencia una diversidad más alta en el sistema léntico que en el sistema lótico.

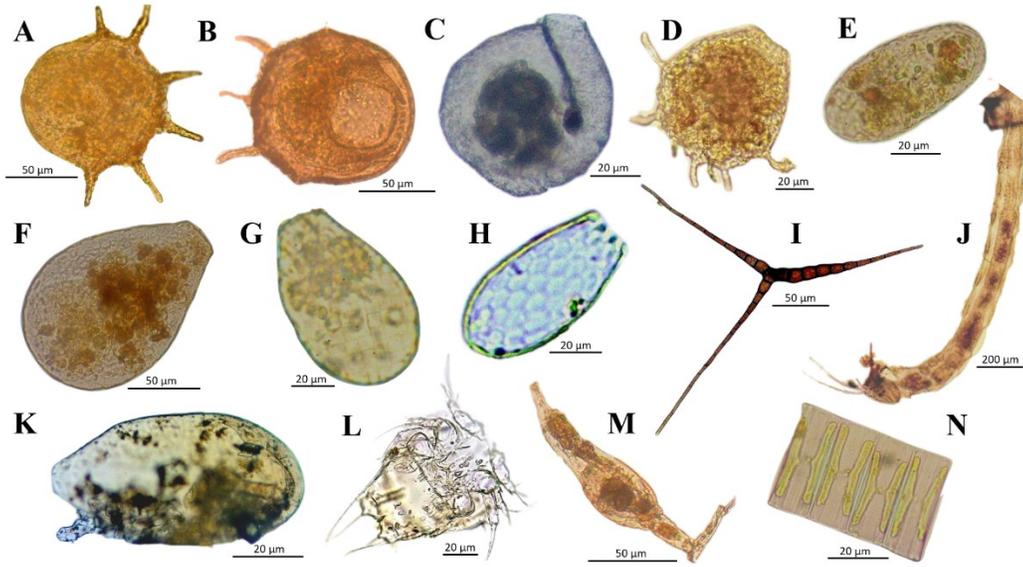


Fig. 3. Organismos representativos encontrados en las muestras de estigobiota. A y B: *Centropyxis discoides* C: *Lesquereusia spiralis* D: *Argynnia caudata* E: *Trinema* sp. F: *Nebela collaris* G: *Quadrullella* sp. H: *Euglypha rotunda* I: *Sphacelaria* sp. J: Chironomidae K: *Colurella* sp. L: Nauplio de copépodo M: *Rotaria* sp. N: *Eunotia* sp.

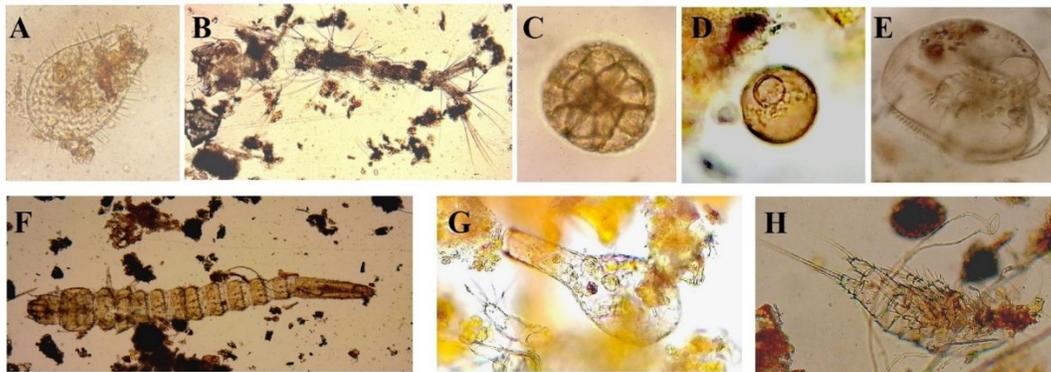


Fig. 4. Organismos representativos encontrados en las muestras de estigobiota. A: *Euglypha strigosa* B: Culicidae C: *Pandorina* sp. D: *Arcella* sp. E: *Euplotes* sp. F: Elmidae G: *Nebela* sp. H: Copepoda (Harpacticoida).

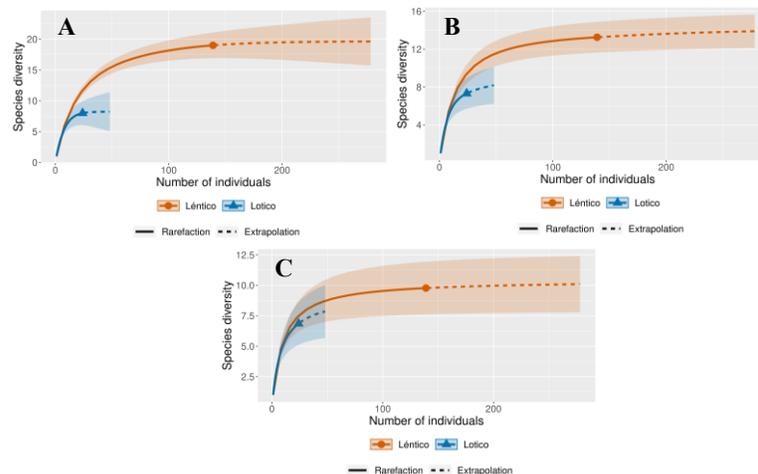


Fig. 5. Curva de acumulación de especies con rarefacción y extrapolación utilizando los números de Hill para la biodiversidad alfa. A) Riqueza de especies ( $q_0$ ). B) Diversidad de Shannon ( $q_1$ ). C) Diversidad de Gini-Simpson ( $q_2$ ).

#### 4.5 Curva de acumulación y números de Hill

La curva de acumulación de especies alcanzó la asíntota para el sistema léntico con 20 gotas de agua y para el sistema lótico, con 15 gotas de agua. La curva de acumulación indica un muestreo y una proyección de datos bastante similar, donde los datos originales sugieren que se encontraron la mayoría de las especies en las muestras revisadas y la extrapolación de los datos generó una curva de rarefacción, que indica que las gotas revisadas fueron suficientes para estimar la diversidad de las muestras (Fig. 5). Los números de Hill se graficaron para estimar la riqueza y la biodiversidad alfa de las especies. Estos mostraron una estabilización para cada uno de los números ( $q_0$ ,  $q_1$  y  $q_2$ ), por lo que es posible que se hallan encontrado la mayoría de las especies pertenecientes a la cueva. Sin embargo, en las curvas se evidencia una diversidad más alta en el sistema léntico que en el sistema lótico.

La eficiencia del muestreo dio un valor muy cercano o igual a 1 (Fig. 6), donde nos indica que el esfuerzo fue suficiente y eficiente con respecto al número de organismos encontrados por gotas de agua en los dos sistemas de aguas subterráneas (léntico y lótico), dando a entender que se cubrió el 100% de las coberturas.

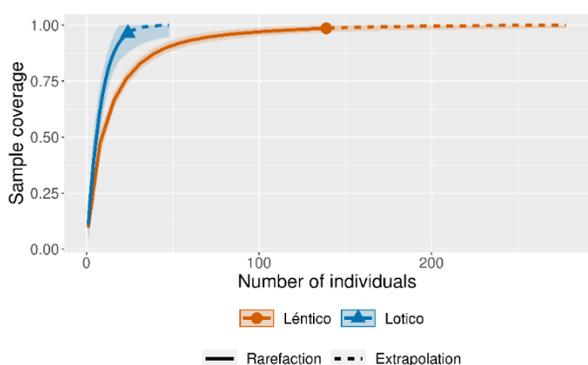


Fig. 6. Cobertura del muestreo utilizando la cantidad de individuos encontrados.

### 5. DISCUSIÓN

Los organismos identificados en las muestras de agua dentro de la cueva, no son especies con distribuciones estrictas a estos tipos de hábitat, ya que también se encuentran en ecosistemas de aguas superficiales como humedales (Zapata y Rudolph, 2008). Sin embargo, por los antecedentes de Pineda (2017) y Pineda y Lasso (2019), se pueden identificar como organismos frecuentes en los sistemas de cavernas colombianas, donde la diversidad varía según la región estudiada. La presencia de estos organismos en cuevas y sistemas de aguas subterráneas en

Latinoamérica no ha sido estudiada, esto puede deberse a que usualmente estas especies se asocian a aguas superficiales.

Estos organismos se encuentran en hábitats con poca materia orgánica donde los cambios de pH y oxígeno en el agua pueden influir en su distribución (Fernández y Zapata, 2011). El pH ácido es un factor determinante entre las cuevas de la Amazonia. Los organismos encontrados como tecamebas, rotíferos, ciliados, crustáceos y ácaros pueden sobrevivir en valores de pH cercanos a 5, siendo asociados a aguas ácidas, con pocos niveles de oxígeno disuelto (3-6 mg/l) y escasez de nutrientes (Gracia, 1976; Zapata y Rudolph, 2008).

La ausencia de luz no parece ser un factor limitante para la distribución de estos microorganismos en cuevas tropicales o templadas. Hay registros de poblaciones de estos grupos en cenotes y cuevas sumergidas en México (Sigala *et al.*, 2016), y cuevas templadas/frías en diversas partes de Europa como Italia, Croacia y Rusia (Baković *et al.*, 2022), donde este tema ha sido estudiado en mayor detalle.

La diversidad de amebas testadas en el presente estudio fue del 40% en toda la muestra. Siendo unos de los organismos más diversos en hábitats subterráneos. En un estudio comparativo espacio-temporal en Europa (Croacia), mencionan la presencia de estas amebas en todas las épocas del año, e indican una saprobiidad variable en cada sitio, lo que podría mostrar que la cantidad de materia orgánica e incluso el guano, podría determinarían su distribución dentro de las cavernas (Baković *et al.*, 2022).

Dentro de cuevas se han descrito especies de amebas y otros protozoos que parecen tener distribución muy amplia y cosmopolita. Por ejemplo, otra especie hermana del género *Centropyxys* (*C. bipilata*), fue descrita como una especie que habita cuevas de agua dulce frías/templadas en la zona kárstica montañosa de Croacia y Bosnia y Herzegovina, con una total ausencia de luz. Esto apoya la hipótesis de que existen microorganismos a nivel genérico, con distribuciones cosmopolitas, pero solo en cuevas (Baković *et al.*, 2019). Las cuevas pueden ser hábitats adicionales para otros protistas que tienen distribuciones cosmopolitas e incluso podrían llegar a ser el único hábitat para especies donde solamente se encuentren en este tipo de ambientes (Baković *et al.*, 2022).

Estos organismos son indicadores de calidad de agua, algunos son muy susceptibles al pH y la salinidad, otros son organismos extremófilos, descomponen lignina y celulosa; participan en ciclos de nutrientes, y otras especies pueden capturar carbono; por ello, pueden regular poblaciones de otros microorganismos como bacterias (Gomes, 2005; Zapata, 2006).

La presencia de algas fue relativamente constante entre las muestras revisadas, estas pertenecen a los grupos de algas verdes, diatomeas y algas pardas. Siendo indicadores muy útiles entre la conectividad e intercambio de energía entre los hábitats superficiales y las cuevas (epigeo - hipogeo), por medio de estos organismos podríamos comprender mejor el impacto que causan los hábitats superficiales sobre los subterráneos (Baković *et al.*, 2019). Las algas, al ser organismos microfotótrofos, también podrían aportar un nivel trófico importante para la alimentación de los organismos de mayor tamaño como las tecamebas, rotíferos y copépodos.

Los ecosistemas tropicales han sido menos estudiados en términos de organismos estigobiontes, resaltando la relevancia de la investigación en esta área. Estos estudios proporcionan una comprensión más profunda de la biogeografía y la distribución de las especies microscópicas, así como de su capacidad para sobrevivir en diferentes ecosistemas. Una característica de los ecosistemas Amazónicos, es su escasez de nutrientes y acidez en el agua, condiciones que podrían determinar la supervivencia de varias especies en estos ambientes.

Por último, es importante señalar que la materia en descomposición proveniente del intercambio con la superficie, las bacterias y el guano, representa la principal fuente de alimento de todos los organismos estigobiontes microscópicos en un ambiente aparentemente escaso de nutrientes.

## 6. CONCLUSIONES

Este es el primer estudio sobre la estigobiota cavernícola amazónica y el segundo en Colombia. Esta investigación deja aún muchas interrogantes relativas a aspectos ecológicos básicos, generando preguntas sobre cómo estos organismos pueden vivir en condiciones extremas, pH ácido o muy ácido, escasez de nutrientes y sobre todo ausencia completa de luz.

Estos estudios ayudan a entender cómo funcionan las redes tróficas y el ciclo de nutrientes dentro de las cuevas, ambientes que algunas veces parecen completamente aislados del exterior, aunque en realidad el intercambio de energía en ambientes epigeos e hipogeos es muy frecuente, explicando de esta forma la llegada de estos microorganismos a este tipo de hábitats.

Por otra parte, este estudio preliminar muestra una biodiversidad desconocida hasta el momento de microorganismos cavernícolas, sin embargo, se recomienda hacer un seguimiento espacio-temporal de estas poblaciones. Es necesario implementar varios métodos de muestreo para encontrar la diversidad total de los microorganismos cavernícolas (diversidad alfa), donde los diferentes grupos taxonómicos pueden ser muestreados de diferentes maneras (protozoos, hongos, plancton y bacterias).

## FINANCIAMIENTO

Este artículo fue financiado por *La Venta Esplorazioni Geografiche* y por el programa *Rolex Perpetual Planet*, con el apoyo económico de *Miles Beyond srl.* y *Ferrino* por el apoyo económico y técnico.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

## RECONOCIMIENTOS (ACKNOWLEDGMENTS)

Agradecemos en particular a Rogelio Mendoza y todos los indígenas participantes en la expedición: Eusebio Mendoza (Uitoto, Comunidad Monochoa), Nicolas Mendoza (Uitoto, Comunidad Monochoa), Narciso Perdomo Cabrera (Uitoto, Comunidad Cano Negro), Efrén Jonás Rodríguez (Uitoto, Comunidad Amenaní), Jeth-Li Mendoza Matapi (Uitoto, Comunidad Monochoa), Enoc Ortiz Tivoli (Uitoto, Comunidad Chukikt), Wilmer Anderson Valencia (Uitoto, Comunidad Monochoa), Edward Deibis Gómez (Uitoto), Salvador Andoque (Andoque), Néstor Andoque Macuna Riquísimo-raque (Andoque), Juan Gómez Hernández (Andoque), Manuela Orfelina Ranoque (Uitoto). Un agradecimiento especial a Daniel Straley por iniciar el proyecto con la Venta y a Jules Domine por el impresionante esfuerzo logístico en la organización de la expedición y al Instituto Humboldt.

## REFERENCIAS

- Baković, N., Kepčija, R. M., & Siemensma, F. J. (2022). Transitional and small aquatic cave habitats diversification based on protist assemblages in the Veternica cave (Medvednica Mt., Croatia). *Subterranean Biology*, 42, 43-60.
- Baković, N., Siemensma, F. J., Baković, R., & Rubinić, J. (2019). Testate amoebae in karst caves of the Dinaric arc (South-Eastern Europe) with a description of *Centropyxis bipilata* sp. nov. *Acta protozoologica*, 58(4), 201-215.
- Camacho, A. I., & Valdecasas, A. G. (2006). Lista de estigofauna conocida en la Comunidad de Madrid. *Graellsia*, 62(Extra), 105-108.
- Culver, D.C. & Pipan, T. Subterranean ecosystems. In *Encyclopedia of Biodiversity*, 2nd ed.; Levin, S.A., Ed.; Academic Press: Waltham, MA, USA, 2013; Volume 7, pp. 49-62.

- Di Lorenzo, T., & Sartori, P. (2007). Verso la gestione sostenibile delle acque sotterranee: il progetto geoco nel bacino del fiume Adige. *Adige Etsch*, 1, 6-15.
- Fernández, L., & Zapata, J. (2011). Variación estacional en la comunidad de amebas testadas de una turbera temperada del sur de Chile (Seasonal variation in the testate amoebae community of a temperate peatland from southern Chile). *Boletín de la Sociedad de Biología de Concepción*, Chile, 80, 27-39.
- Galvis, J., Huguett, A. & Ruge, P., 1979. Geología de la Amazonía colombiana. *Boletín Geológico*, 22(3): 3-86.
- Gracia, M. P. (1976). Ecología de las Tecamebas de las turberas pirenaicas. *Miscellània Zoològica*, 3-8.
- Gomes, M. B. (2005). Tecamebas (Protozoa Rhizopoda) associadas às macrófitas aquáticas da bacia do rio Jequitinhonha: Parque Estadual do Rio Preto e Parque Estadual do Grão Mogol, MG. *Revista Unimontes Científica*, 7(2), 129-135.
- Hancock, P. J., & Boulton, A. J. (2008). Stygofauna biodiversity and endemism in four alluvial aquifers in eastern Australia. *Invertebrate Systematics*, 22(2), 117-126.
- Ibáñez-Mejía, M., Ruiz, J., Valencia, V.A., Cardona, A., Gehrels, G.E. & Mora, A.R., 2011. El Orógeno Putumayo de Amazonia y sus implicaciones para las reconstrucciones de Rodinia: New U- Pb geochronological insights into the Proterozoic tectonic evolution of northwestern South America. *Precambrian Research*, 191(1-2): 58-77
- Moreno, C. E. (2000). Métodos para medir la biodiversidad. Volumen 1. Manuales y tesis SEA.
- Padilla Gil, D. N. (2023) Zoología de Invertebrados. Editorial Universidad de Nariño, San Juan de Pasto-Nariño. ISBN 978-628-7509-65-8
- Pineda, L. (2017). Determinación de estigofauna en las aguas subterráneas de la subregión del Urabá antioqueño, Colombia. (Tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Pineda, L. & Lasso, C. A. (2019). Estigobiota microscópica derivante de las cuevas y cavernas de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. Pp. 175-187. En: Lasso, C. A., J. C. Barriga y J. Fernández-Auderset (Eds.). 2019. Volumen VII. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia. Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.
- Roldán, G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Fondo FEN, Medellín. 235 pp.
- Saccò, M., Blyth, A. J., Douglas, G., Humphreys, W. F., Hose, G. C., Davis, J., & Halse, S. A. (2022). Stygofaunal diversity and ecological sustainability of coastal groundwater ecosystems in a changing climate: The Australian paradigm. *Freshwater Biology*, 67(12), 2007-2023.
- Sauro, F. y Lasso, C. A. (2024). Geoquímica y espeleogénesis de cuevas de cuarzo-arenita en la serranía de Chiribiquete, sector de los ríos Caquetá y Yari, Colombia. *Boletín Geológico*, 51(2).
- Sauro, F., Lundberg, J., De Waele, J., Tisato, N. & Galli, E., 2013. Speleogenesis and speleothems of the Guacamaya Cave, Auyan Tepuy, Venezuela, Proceedings of the 16th International Congress of Speleology, Brno, pp. 298-304
- Siemensma, F. J., Microworld, world of amoeboid organisms. World-wide electronic publication, Kortenhoef, the Netherlands. Searched on May 4, 2024.
- Sigala, I., Lozano-García, S., Escobar, J., Pérez, L., & Gallegos-Neyra, E. (2016). Testate amoebae (Amebozoa: Arcellinida) in tropical lakes of Central Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 377-397.
- Streble, H., & Krauter, D. (1987). Atlas de los microorganismos de agua dulce: la vida en una gota de agua: libro de clasificación con 1700 ilustraciones. Omega.
- Zapata Madrid, J. (2006). Estado de conocimiento de los tecamebianos dulceacuicolas de Chile. *Gayana (Concepción)*, 70(1), 27-30.
- Zapata, J., Yáñez, M., & Rudolph, E. (2008). Tecamebianos (Protozoa: Rhizopoda) de una turbera del parque nacional Puyehue (40 45'S; 72 19'W), Chile. *Gayana (Concepción)*, 72(1), 9-17.