# FUNDACIÓN DE INVESTIGACIONES ESPELEOLÓGICAS DEL KARSO PUERTORRIQUEÑO

## CURSO DE INICIACIÓN A LA ESPELEOLOGíA

## INTRODUCCIÓN

Este curso de iniciación a la espeleología cumple al menos tres objetivos. El primero es cumplir con el reglamento de la Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño – FIEKP -, el cual requiere que para adquirir cierta categoría de miembro es necesario tomar un curso básico de espeleología. El segundo es la necesidad de llenar un vacío que existe, ya que no se ha estado ofreciendo regularmente un curso de iniciación a la espeleología, aunque se dictó uno en el 1996. La información en este manual, es uno más amplio que el dictado en el 1996. El tercer objetivo es que sirva de cimiento, para que se elabore un curso con mas información que le sirva, no tan solo a los miembros de FIEKP, sino a todos los grupos espeleológicos en Puerto Rico.

Este manual, intenta llenar la necesidad de divulgación sobre lo que es y de que trata la espeleología. En este curso básico se pretende desarrollar estas ideas con el propósito de brindar una herramienta de trabajo a espeleólogos con interés en profundizar en el conocimiento del interesante mundo subterráneo. Se espera que resulte de utilidad tanto para los experimentados como para los que se inician en estos apasionantes estudios.

Esta parte del curso trata sobre la espeleología como **campo de estudio** y no cubre otros aspectos como las técnicas de exploración espeleológicas, las cuales son imprescindibles para hacer las exploraciones y los estudios en forma segura y responsable. El dominio de estas técnicas y el de una buena condición física, no se debe de menospreciar en ningún momento. No debemos olvidarnos que el ambiente en las cuevas no es uno al cual estamos acostumbrados. Es uno donde potencialmente puede haber uno o varias de las siguientes condiciones: oscuridad absoluta, pasillos de forma irregular y laberínticos, grandes colapsos que hacen difícil el desplazamiento, corrientes de agua con potencial de inundación, pozos (caídas) muchas veces profundas, aire "malo", etc. Estas condiciones pueden poner su vida y la de los demás en riesgo, si se carece de la preparación adecuada. Por eso nunca viole las reglas de exploración segura que es importante para poder disfrutar de una experiencia inolvidable.

Esperamos que este curso sirva para estimular su interés en el estudio de la espeleología y que ayude a contribuir al estudio de las cuevas de Puerto Rico.

*"El mundo sublime de las sombras y el silencio de las cuevas y simas no está abierto ni es accesible a todos los humanos. Es un mundo para los decididos, que con desusada frecuencia exige gran esfuerzo y resistencia física y en muchos casos, audacia rayana en la temeridad. En todos los casos, para gozar plenamente del espectáculo de la caverna pura, requiere exaltadas cualidades espirituales y morales y para realizar exploraciones de algún interés, una suma de conocimientos espeleológicos que de lo contrario harían estéril el esfuerzo".*

Julio Martínez Santa-Olalla
(Prólogo de Diez Años Bajo Tierra de Norbert Casteret)

*"No solo son dignas de ser descritas las formas prodigiosas de las estalagmitas y estalactitas, los precipicios abiertos por las fuerzas elementales de la Naturaleza o los hielos eternos de las cavernas gigantescas, sino también la vida orgánica que se desarrolla en esta mansión de las tinieblas, los hallazgos de esqueletos humanos y animales prehistóricos; la vida de los insectos, reptiles, y plantas; el agua que fluye por las profundidades; la temperatura y las condiciones eólicas que en ella reinan; los elementos y las rocas que integran las montañas. Muchas cuevas revelan, como un libro abierto, la evolución geológica y la contextura de la corteza terrestre; dicen mucho de la vida de los tiempos remotos, aunque la presenten solo en forma de huesos de animales extintos y de plantas y seres marinos fósiles, e incluso nos ofrecen una visión de la existencia de los hombres prehistóricos o históricos que utilizaron estas cavidades ya como morada, ya para fines religiosos".*

Anton Lubke(Los Misterios del Mundo subterráneo)

## Conservación y Ética

La importancia de este asunto es una de naturaleza fundamental en la formación de la matrícula de FIEKP, para que siente las normas bajo las cuales nos habremos de regir, así como para evitar que criterios ajenos a estas normas traten de ser usadas como legítimas en la relación de un espeleólogo con la naturaleza.

### Conservación y Ética Espeleológica y Ecológica

Este es un tema de mucha importancia y podríamos decir también que resulta ser uno de mucha controversia en la comunidad espeleológica mundial. A pesar de ello, se ha escrito muy poco en la gran mayoría de los libros sobre temas de espeleología.

Cuando hablamos de conservación y ética espeleológica nos referimos a como nos relacionamos con el entorno de la cueva y el contenido de la misma. Este asunto es importante ya que veremos cuando concluyamos este curso de iniciación a la Espeleología, entre otras cosas lo siguiente:

1. Las cuevas naturales se han formado por una serie de factores totalmente independiente de la acción de los seres humanos y que por ser parte de la naturaleza tienen valor intrínseco independientemente del valor que le asignemos los humanos.

2. Estos procesos de formación de cuevas naturales en las rocas calizas son lentos y toman cientos de miles o millones de años y que los espeleotemas que contienen se han tomado miles o decenas de miles de años en formarse.

3. Que la estabilidad climática de las cuevas y otros factores han permitido que la vida se desarrolle en las mismas con unas características bien particulares, tanto bióticas como abióticas, en una estrecha interrelación e interdependencia. De alterarse el medio que les permite sobrevivir a estos organismos puede causar su **extirpación** o **extinción** si son **endémicos** de esa cueva solamente.

4. Las cuevas son unos depósitos de información para muchas de las ramas de las ciencias naturales o para algunas de las ciencias sociales. No obstante la investigación científica debe de ser una sumamente cuidadosa, que en ningún momento ponga en riesgo a la cavidad ni al contenido de esta.

5. Cuando sea imprescindible tomar muestras de especímenes debe de evaluarse con todo rigor científico la población de las mismas ya que la remoción de algunos individuos puede ser causa para su extirpación o extinción. Se deberá tratar de la misma forma lo **abiótico** de la cavidad, ya que cualquier otra cosa dentro de la cueva puede ser parte fundamental para la supervivencia de estas especies o ser única muestra como tal dentro de la misma.

6. La espeleología, tiene un interés fundamental en la exploración y la investigación de las cuevas pero manteniendo un criterio de conservación como el aquí descrito.

7. Dicha exploración e investigación, además del conocimientos sobre técnicas adaptadas para las necesidades espeleológicas (técnicas verticales, espeleo-socorro, conocimientos de riesgos en la exploración de cuevas, etc.) son necesarias para poder tener acceso a lugares de difícil acceso en una forma segura. Que es responsabilidad personal de cada uno/a de aprender y practicar las mismas.

8. Se reconoce que existen áreas de difícil acceso y que muchas veces requiere de ciertas habilidades que algunas personas poseen en mayor medida que otros/as, pero esto de por sí no hace de la espeleología un deporte. Toda cueva es importante y no debe de ser la motivación principal de un espeleólogo cuan rápido cruza la cavidad o si es la de mayor desnivel o desarrollo. Lo importante para el espeleólogo es cuantas ha documentado, así como la cantidad y calidad de lo documentado de cada una.

## Ética Ambiental y Ecológica

Las cuevas y lo que contienen no se dan en un vacío, sino que son parte integral de la naturaleza. Veremos como el agua de lluvia se vuelve acidulada y como los distintos componentes de la naturaleza se interrelacionan para que ello suceda. Las alteraciones a estos procesos por el ser humano cambian sustancialmente estas variables naturales. En el caso de Puerto Rico las regiones kársticas, donde están las cuevas, contienen la mayor diversidad biológica (biodiversidad), además de tener unos rasgos fisiográficos que las hacen únicas y que posibilitan esta biodiversidad.

¿Por qué es necesario entonces una ética hacia la naturaleza? Veamos algunos ejemplos para tratar de entender la necesidad de la misma. Mencionemos algunos de los problemas ambientales:

1. Calentamiento global
2. Contaminación del aire
3. Contaminación del agua
4. Erosión de los suelos
5. Pérdida de diversidad biológica
6. Materiales no biodegradables que se convierten en basura
7. Químicos sintéticos que no se encuentran en la naturaleza
8. Destrucción y fragmentación de las distintas regiones kársticas
9. Destrucción y vandalismo en las cuevas

Y muchos otros que ustedes podrían añadir. Tenemos que preguntarnos: ¿Quién es el responsable de los problemas ambientales y ecológicos?

La respuesta es que somos los seres humanos y la sobrepoblación de la especie humana, los responsables.

Existen en la naturaleza una serie de leyes, no humanas, que mantienen un balance entre lo **biótico** y lo abiótico. Estas leyes han permitido el desarrollo y la evolución de la vida, incluyendo la humana, sobre el planeta tierra. Ha creado a través de los tiempos geológicos, una red sumamente compleja de interrelaciones e interdependencia, denominado por algunos científicos como la red de la vida, la cual el ser humano apenas ha comenzado a comprender. Ninguna otra especie, con excepción de la especie humana tiene la posibilidad técnica de alterar dicha red, a pesar de que en el proceso destruya las propias bases de su supervivencia.

El espacio físico del planeta es uno fijo y en el cabe una cantidad finita de especies y poblaciones que componen la biodiversidad. Esta limitación se llama la capacidad de acarreo. Podemos imaginarnos el planeta como una nave espacial, ya que el mismo le da la vuelta al sol, con todos a bordo. Los problemas ambientales que mencionamos anteriormente, agudizados por un consumo desmedido por una parte de la población de los paises más desarrollados y con una demanda en aumento por la población de los países menos desarrollados para consumir en forma similar a lo que más consumen, terminan destruyendo los hilos de la red y poco a poco hacen colapsar los distintos ecosistemas y destruyendo la vida como la conocemos.

Es por ésto que los humanos somos responsables de los problemas ambientales que tenemos. Solamente asumiendo una actitud ética de respeto a la naturaleza, es que podemos detener que los remaches que sostienen esta gran nave llamada planeta tierra se suelten y terminemos destruyendo esta gran obra de la Naturaleza.

Otro elemento a considerar es uno de carácter legal. En Puerto Rico la Ley 111 de julio 12 de 1985 establece que ".... toda persona que voluntariamente ..... matare, dañare, molestare, o removiere cualquier animal o planta que se encuentre en cualquier cueva, caverna o sumidero... incurrirá en delito...."; así como que para "... realizar estudios científicos que tomen muestras de aguas, aire, fauna, flora y materiales naturales..." se requiere "...el previo consentimiento escrito del Secretario de Recursos Naturales y el dueño del predio o finca en que ubique el acceso o accesos...".

## ¿ Que es la Espeleología?

Para poder estudiar las cavernas el ser humano tiene que lógicamente entrar en ellas y explorarlas. En tiempos recientes las personas entran a explorar cuevas por curiosidad, como recreación o por interés económico. Pero nada de lo anterior constituye espeleología. La espeleología es una de las ramas de la Karsología (sinónimo de carsología). Espeleología, cuya raíz etimológica parte de las palabras griegas *spelaion* (caverna) y *logos* (tratado), se dedica al estudio de las cavidades. Actualmente, este

término se aplica en su sentido más amplio a la disciplina consagrada al estudio de las cavidades, de su génesis y de su evolución, del medio físico que representa, de su poblamiento biológico actual o pasado.

Podemos afirmar que la exploración de las cavidades por los seres humanos es tan vieja como el mismo. En numerosas cuevas en el planeta se pueden encontrar signos de la presencia humana prehistórica desde huellas de pisadas, utensilios, arte rupestre, enterramientos, etc. Muchas de las cavidades les servían de hogar y otras para ritos religiosos. Los indios en lo que llamamos hoy día Puerto Rico, usaban muchas de las cavidades para guarecerse de las tempestades e inclusive como albergue. Para los Tainos, las cavidades tenían un significado religioso, ya que de las mismas emergió la vida.

**Breve historia de la Espeleología**

Pese a las numerosas citas que se pueden encontrar referentes a exploraciones subterráneas a lo largo de la historia, inclusive en Puerto Rico, no podemos hablar propiamente de espeleología hasta mediados del siglo XIX (19 ). Es entonces cuando se iniciaron las exploraciones sistemáticas, con el francés Edouard Alfred Martel, padre de la espeleología. Martel comienza a explorar la región de Grands Causses, al sur del Macizo Central francés. Sus exploraciones se extendieron rápidamente por los países circundantes. A principios del siglo pasado (XX) el rumano Emile Georges Racovitza, junto al francés René Jannel fueron los pioneros de la bioespeleología, desarrollando un trabajo de búsqueda y estudio biológico por una gran cantidad de cavidades en el mundo.

El interés y estudio de la espeleología se disemina por el resto de Europa a principios del siglo XX. En América los primeros grupos espeleológicos se forman en Cuba, Estados Unidos y Brasil. Luego se extiendo por distintos países de América. La espeleología es una de las ramas nuevas dentro de las ciencias naturales y depende de un enfoque multidisciplinario para su estudio. Las cavidades como laboratorios naturales requieren de la geología, hidrogeología, paleontología, química, biología, arqueología y muchas otras ciencias para estudiar las mismas y su contenido. No hay que ser un científico en ninguno de los campos anteriores, para estudiar las cavidades y poder aportar a la información necesaria sobre las mismas. Con tomar datos topográficos y anotar aquellos elementos obvios, como organismos vivientes, arte rupestre y otros datos de interés y ubicarlos en la cartografía ya se esta aportando al conocimiento de estas cavidades. Sobre esta información van otros trabajando con el tiempo y la suma del conocimiento del conjunto es lo que nos permite tener un campo de conocimiento como la espeleología.

**La espeleología en Puerto Rico**

A pesar de la gran cantidad de cuevas con que cuenta la Isla, no fue hasta finales los años cincuenta que comienza la exploración continua y sistemática de las cavidades en Puerto Rico, con el joven profesor Norman Veve. Veve visita la cueva de Aguas

Buenas y queda fascinado, lo que lo motiva a continuar con las exploraciones junto a un grupo de amigos. Este grupo de exploradores se organizó en la Gruta Trogloditas en 1969. Simultáneamente hay al menos otro grupo de la región de Arecibo, que también estaba explorando cuevas. Cuando Veve conoce a los Gurnee, un matrimonio de espeleólogos de la NSS, y con quienes inicia una relación de colaboración en la exploración de cavidades en PR, especialmente el sistema de Río Camuy, la Gruta Trogloditas se convierte en un capítulo (Grotto) de la National Speleological Society de los Estados Unidos, conocida como la NSS.

La Gruta Trogloditas continua como organización hasta el 1976, cuando cambia de nombre a la Sociedad Espeleológica de Puerto Rico. Mientras tanto otro grupo se había formado en la parte oeste conocido como Sociedad de Avance Espeleológico, por el profesor Luis Pumarada, posteriormente se formó la Sociedad de Estudios Espeleológicos del Norte (región norte-central) y la Sociedad Espeleológica Universitaria del Sur, que luego cambia su nombre a Sociedad Espeleológica Unida del Sur (región del sur de PR ). Uno de los últimos grupos en formarse es el nuestro, la Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño -FIEKP-.

Hay que reconocer que los grupos espeleológicos locales han colaborado con otras entidades espeleológicas y científicas mayormente de Estados Unidos y Canadá, quienes han publicado bastante sobre sus hallazgos. La mayoría de los grupos espeleológicos locales lo que hicieron fue explorar los sistemas más grandes de cuevas, como Río Camuy y Encantado, Cucarachas y otras. De las cuevas mencionadas, que se conozca todavía no hay una cartografía final, a pesar de que se han topografiado las mismas parcialmente. Algunos logros de la espeleología en PR son la colaboración en los trabajos de agrimensura del Parque de las Cavernas del Río Camuy, la protección con un portón a la entrada de cueva Sorbetos y la Ley 111 de 1985 para proteger las cuevas, cavernas y sumideros. También se dio a conocer bastante sobre las cuevas de Puerto Rico en los medios y se ofrecieron conferencias a escuelas y otras entidades.

A pesar de contar con casi cinco décadas la espeleología en el país, el estudio sistemático de las cavidades en la Isla por parte de los las distintas organizaciones ha sido bien poco. De los estudios hechos en las cavidades de la isla, casi todos los estudios corresponden a personas de Estados Unidos y Canadá. Las organizaciones espeleológicas locales, apenas han publicado algo, y por el otro lado no existe una entidad oficial que sea el custodio para la posteridad de lo que se ha hecho, especialmente las cartografías completadas de algunas de las cuevas. Tampoco se cuenta con un catastro de cavidades con información útil para los que deseen obtener información sobre las mismas.

Con respecto a la protección de las cavidades en Puerto Rico, la responsabilidad recae sobre el D.R.N.A. según lo dispone la ley. La realidad es que la agencia realmente nunca le prestó atención a la protección de las cavidades y menos aun poner en vigor la Ley 111 de 1985. Quince años han pasado desde que se promulgo esta ley, la cual requiere que se redacte reglamento, lo cual aun carece. Hasta el año 1994 no se había

radicado nunca una querella por violar la Ley 111. Lamentablemente los grupos espeleológicos fallaron en exigir que la misma fuese implantada, ya que una gran cantidad de cavidades se estaba vandalizando o destruyendo a pesar de que había una ley para protegerlas.

Una de las razones principales de la fundación de FIEKP en el 1995, es la insatisfacción de un grupo de personas con el silencio, algunas veces cómplice, de la destrucción de las cavidades y del karso. Nos habíamos dado cuenta de que no había forma de proteger las cavidades sin proteger el karso. Esto situación llevo a que optáramos por hacer un grupo espeleológico con una fuerte ética ambiental y con interés de contribuir a los estudios de las cavidades en y fuera de Puerto Rico.

En el corto tiempo que lleva FIEKP ha tenido muchos logros, entre estos restablecer los vínculos con la Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe (FEALC) y con la Unión Internacional de espeleología (UIS) [siglas en francés]. Se ha participado en los Congresos de la FEALC, en Argentina y de la UIS en Suiza y Brazil, así como en el Congreso de Sociedad Espeleológica de Cuba. La participación en la FEALC ha sido una activa en donde se asigno la responsabilidad de ofrecer talleres de espeleosocorro, trabajo que han dirigido los hermanos de SEENI junto a miembros de FIEKP. Tanto en la FEALC, como en la UIS tenemos una posición en la Junta de Directores de ambos organismos. Se ofreció el primer curso de una semana de Introducción a la espeleología en el 1996 y se organizo una expedición multidisciplinaria a la Rep. Dominicana en el 1998. Hemos colaborado en exploraciones paleontológicas, trabajos que han sido publicados. Además hemos estado haciendo trabajos de topografía para hacer la cartografía de las cavidades de una parte de la región del karso del norte. Lo anterior se ha logrado gracias al trabajo incansable de muchos en FIEKP para tratar de sembrar la semilla de una espeleología que contribuya al estudio sistemático de las cuevas en Puerto Rico.

**Geología de Puerto Rico y sus regiones kársticas**

Las capas rocosas son las páginas de la historia de la Tierra y la geología es el estudio de la disposición de los materiales que constituyen la **litosfera** terráquea (capa más externa del globo terráqueo, de material rígido y consistente, pero susceptible de deformación limitada en las circunstancias físicas de la escala geológica de tiempos. Grosor medio de 100 Km. ) de las causas que originan esa disposición y de los efectos de los agentes que los alteran. Los procesos geológicos solo se pueden entender en la escala geológica de tiempo. Los seres humanos estamos acostumbrados a la escala de tiempo humana, lo que nos dificulta entender una escala de tiempo como la geológica. Los tiempos geológicos, de unos 4,500 millones de años, se dividen en lo que se llama una tabla de cronología estratigráfica, la cual se ha ido modificando a través de los años en función del progreso de las ciencias. Los tiempos geológicos son tan amplios que la precisión es del orden de +/- 1 a 3 millones de años en el Oligoceno al Jurásico, de +/- 4 a 5 millones de años para el Triásico y de +/- 5 a 10 millones de años para el Paleozoico.

Con la separación, por acción de las placas tectónicas, de los continentes que formaban a Pangéa, (cada 400 a 500 millones de años los continentes se agrupan en una sola masa y luego se dispersan y la última gran masa de continentes juntos se llamó Pangéa) se fue formando una placa tectónica de corteza oceánica hace aproximadamente 200 millones de años (Pindell 1994), que se conoce como la placa del Caribe. Las placas tectónicas están en continuo movimiento y cuando dos placas oceánicas chocan y una se desliza bajo la otra placa (subducción) esta se destruye fundiéndose en el manto. La placa oceánica del Caribe chocó con la placa de corteza oceánica que eventualmente sería la de América del Norte deslizadonse esta última bajo la del Caribe. Cuando esto sucede se forma un arco de islas volcánicas y en el caso de la placa del Caribe, es lo que da origen a las islas que eventualmente forman las Antillas mayores y posteriormente a las Antillas Menores.

Para tener una idea de algunos de los eventos geológicos que dieron base a la isla de Puerto Rico ver tabla 1 y 2.

**Tabla 1 (ver página 10)**

**Tabla 2.** Generalización de la secuencia estratigráfica en Puerto Rico

| COMPLEJO | CARACTERÍSTICAS | EDAD |
|---|---|---|
| NEOAUTÓCTONO | Rocas carbonatadas y carbonatado-terrígenas, poco plegadas o no plegadas, basculadas y con fallas locales; tectónica vertical predominante. | POST-EOCENO SUPERIOR [40 MA a.p. hasta el presente] |
| DE LOS ARCOS DE ISLAS | Rocas vulcanógenas, vulcanógeno-sedimentaria e istrusivas (plutones graníticos) plegadas y falladas, con tectónica tangencial predominante. | PALEOCENO (O MAESTRICHTIANO) al EDOCENO MEDIO [70 MA a 45 MA] CRETÁCICO INFERIOR (ALBIANO) AL CRETÁCICO SUPERIOR (SANTONIANO-CAMPANIANO) [110 MA a 70 MA] |
| OFIOLÍTICO | Rocas del basamento oceánico (serpentinitas) tectónica tangencial. | JURÁSICO AL CRETÁCICO INFERIOR (ALBIANO) [200 MA a 110 MA] |

El territorio de Puerto Rico, el cual tiene rocas de unos 160 millones de años de antigüedad, a evolucionado en el tiempo geológico y se ha ido desplazando hasta ocupar

Table 1. Phanerozoic geologic timescale (Behrensmeyer et al. 1992) with reference to events in Puerto Rico and elsewhere in the world: Million years ago is Ma and represent the estimated time when the period, epoch, or era started. The duration of any period, epoch, or era can be estimated by subtracting the time it started from the time when the next period, epoch, or era started. L = late, M = middle, and E = early.

| Era | Period | Ma | Epoch | | Ma | Events |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CENOZOIC | QUATERNARY | Anthropogene 2 | Holocene | | 0.01 | Humans (indians) start to populate Puerto Rico/extinction of land mammals.<br>End of last Ice Age.<br>Puerto Rico attains its actual form. - no geograficamente |
| | | | Pleistocene | | 2 | Extinction of land mammals in Puerto Rico between this epoch and the next.<br>Surficial deposits on the Island-- alluvium, marsh, swamp, eolian, and terraces.<br>Glaciations-- several occur making sea levels rise and fall.<br>Evolution of humans-- from *Homo habilis* to *Homo sapiens sapiens*. |
| | TERTIARY | Neogene 23 | Pliocene | | 5 | Landbridge (Panama Isthmus) completed connecting South and North America.<br>Solution of limestone-- accelerated by corrasion-- from this epoch until the present.<br>Emergence of limestone above sea level.<br>Many different (up to five genera) land mammal species live on the Island.<br>Bipedal primate evolution-- from *Australopithecus* to *Homo habilis*. |
| | | | Miocene 23 | L | | Camuy Formation being formed.<br>Rising of Puerto Rico-- fracture occurs on the four sides giving it its actual shape.<br>Beata Ridge deformation allows eastern Caribbean Plate to move separately from Western Plate |
| | | | | M | | Arching along the center of the island landmass, due to orogenic movements in the Caribbean, older tertiary strata emerge and north coast submerges. |
| | | | | E | | Aymamón Limestone is being formed in the north.<br>Aguada Limestone being formed in the north.<br>Upper members of Cibao Formation being formed in the north.<br>Ponce Limestone being formed in the south.<br>Caribbean plate moves to the west.<br>The landmass that stretched from the Virgin Islands to La Hispaniola is still in place. |
| | | Paleogene 65 | Oligocene 34 | L | | Cibao Formation limestone members being formed in the north.<br>Lares Limestone upper part being formed in the north.<br>Juana Díaz formation being formed in the south. |
| | | | | M | | Lares Limestone being formed in the north.<br>Juana Diaz Formation being formed in the south.<br>San Sebastián Formation being deposited in the north.<br>Mountains higher than 3175 m exist allowing growth of three plant species that exist from cool to temperate climate.<br>Amber from Dominican Republic contains many invertebrates and few vertebrates. |
| | | | | E | | A large island stretches from Virgin Islands to La Hispaniola.<br>*Acrotocnus* -- species of ground sloth-- roamed the landmass.<br>Caribbean Plate starts shift to a more westerly direction. |
| | | | Eocene | | 55 | Rocky Mountains formed.<br>South America isolated from other continents.<br>Intense erosion of mountains of Puerto Rico.<br>Hight mountains near Utuado and Ciales |
| | | | Paleocene | | 65 | Palms, cacti, and pines evolve.<br>Andes Mountain range develops.<br>Birds diversify in many sub classes.<br>Cuevas Limestone in the south.<br>Batholith of Utuado and San Lorenzo<br>Caribbean Plate moves west-northwest |
| MESOZOIC | Cretaceous 141 | | | L | 89 | Rising of large island from Virgin Islands to La Hispaniola.<br>Caribbean crust acuvely deforming.<br>Extinction of dinosaurs.<br>San Germán Limestone deposit on the southwest.<br>Volcanic islands in what today is Orocovis and Barranquitas. |
| | | | | E | 141 | Angiosperms evolve.<br>Caribbean crust is located to the west of South America.<br>Parguera Limestone deposited on the Southwest.<br>Aguas Buenas Limestone deposited on the flanks of the volcanic island.<br>Millions of years of volcanic activity create islands to the east of Puerto Rico (Greater Antilles Foldbelt). |
| | Jurrassic | | | | 202 | Older volcanic rocks of Puerto Rico.<br>Caribbean seaway starts to form.<br>Western Laurasia (North America) and Western Gonduana (South America) start to break away |
| | Triassic | | | | 250 | Cycadophyta plants.<br>Pangea continent starts to break away.<br>Dinosauria Infra Class. |

sus actuales coordenadas geográficas en su última y más nueva etapa de desarrollo. Al considerar las edades de los objetos, fenómenos y procesos debe considerarse no confundir rocas, formas, suelos y procesos. Por ejemplo, un mogote puede estar constituido por rocas del Mioceno; su relieve (forma), comenzó a desarrollarse en el Plioceno y está rodeado por suelos de Pleistoceno, sometidos a procesos que aún se están desarrollando en el Holoceno o Reciente. En la Fig. 1 podemos ver la fragmentación del banco de Puerto Rico en el Pleistoceno ( ultimos 2 millones de años).

Las principales regiones kársticas de Puerto Rico se encuentran en la isla grande en la parte norte en forma continua desde Loiza hasta Aguadilla, en el sur en forma discontinua desde Juana Díaz hasta Cabo Rojo y en las islas de Mona y Monito. En la parte central de la isla se encuentran numerosos lentes kársticos, (Aguas Buenas, Comerio, Cayey, Barranquitas y otros sitios ). En Vieques y en Caja de Muerto hay unas franjas calizas, aunque hay muy poca información sobre estas.

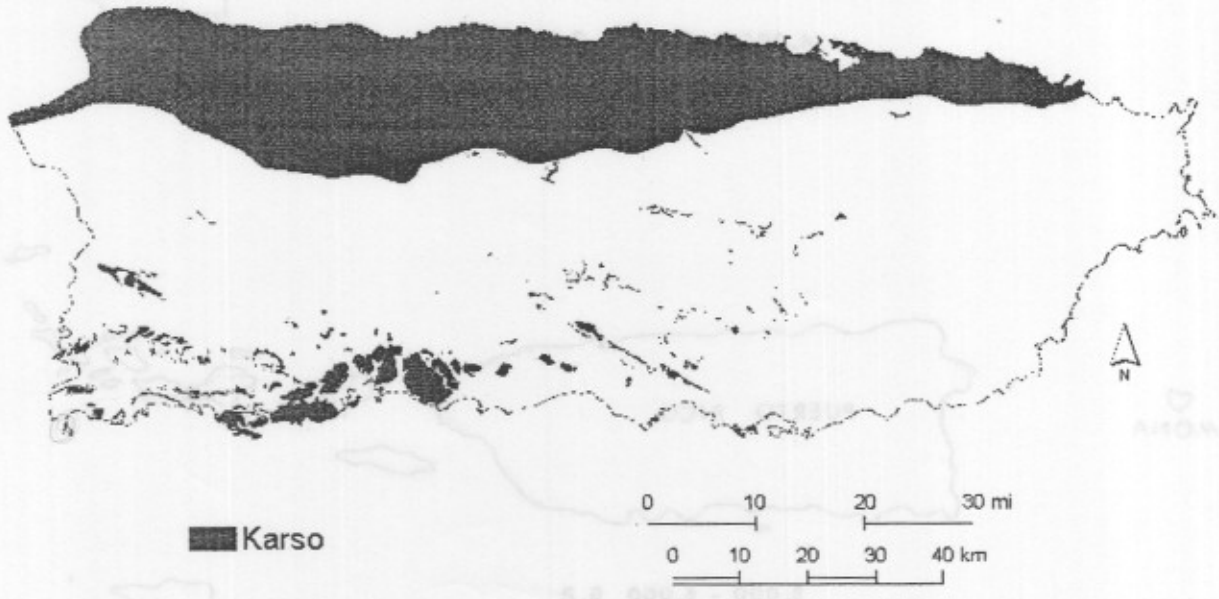
—Supongo que en Culebra no hay...

En la figura abajo mostrada se presenta la distribución generalizada de rocas carbonatadas de Puerto Rico.

**Para figura con fragmentacion del banco de PR (ver página 12)**

**Regiones kársticas de PR**

## Mapa de las Regiones Kársticas de Puerto Rico




**El karso del norte**

La región kárstica del norte constituida fundamentalmente por distintos tipos de rocas carbonatadas del **neoautóctono**, con una potencia de cientos de metros y una

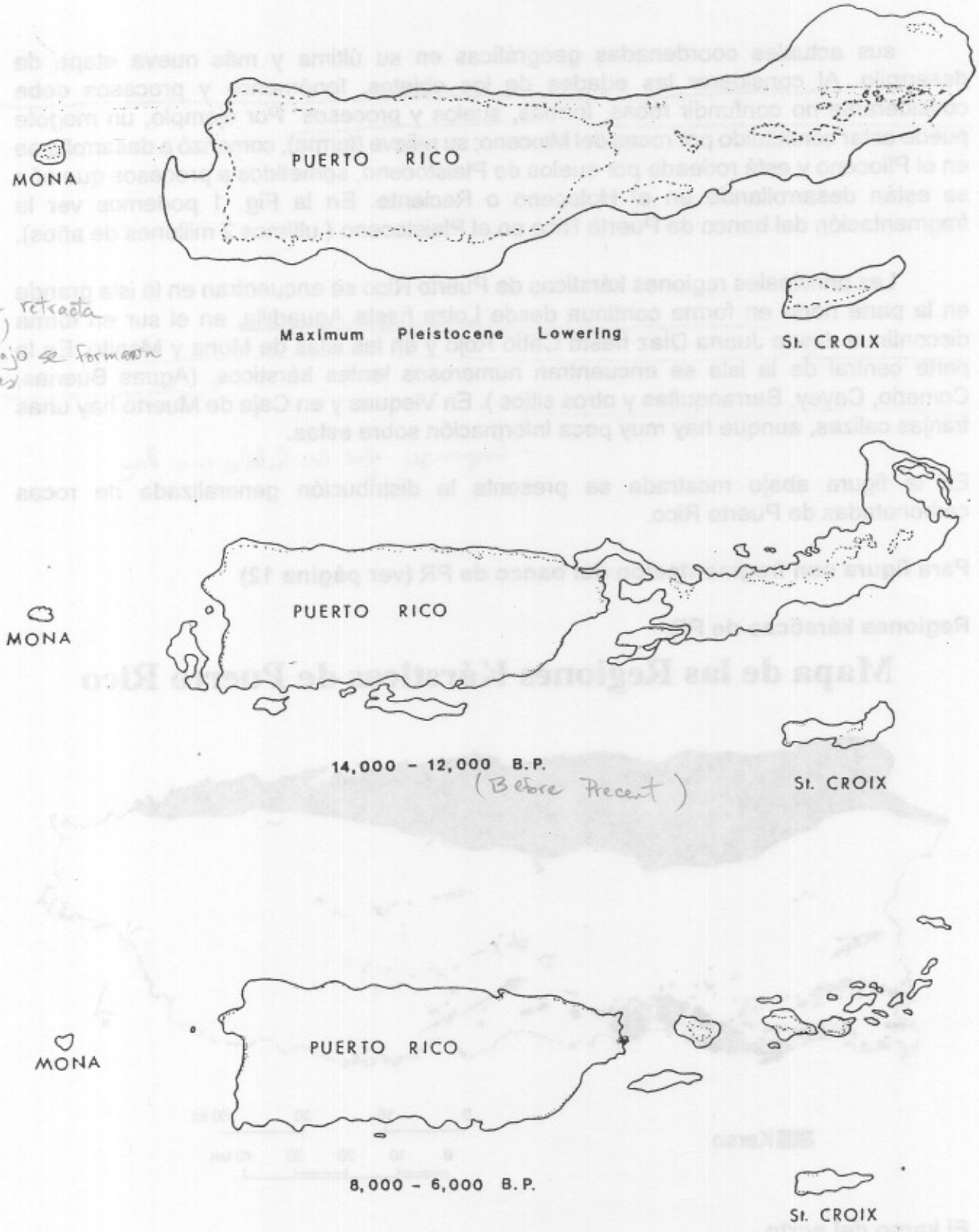



FIG. 1 —Fragmentation of the Puerto Rican Bank by eustatic rising in Pleistocene sea levels. The islands were united as a single land mass during maximum Pleistocene lowering as shown at top. Sea levels were about 75 m below present level in the middle diagram and fragmentation was essentially complete when sea levels rose to about 15 m below present level in Holocene time (bottom). The islands as they exist today are shown by the dashed lines. (Data taken from Heatwole and MacKenzie, 1967.)

estructura de cuestas, **buza** suavemente hacia el norte. Descansa sobre las rocas del complejo vulcanógeno, vulcanógeno-sedimentario e intrusivo (plutónico) del arco de islas y del complejo ofiolítico de basamento (serpentinitas ).

Giusti (1978) estimó que la roca caliza emergió del mar hace unos 4 millones de años. Reconstruyó el perfil original del karso del norte y observó que la superficie original tenia una altura media de 500 metros comparado con 230 metros hoy día, una pérdida de 320 metros a través del tiempo geológico. El promedio de descalcificación fue de 0.070 mm por año.

La estructura de cuesta karsificada alcanza en su borde meridional una altitud promedio de unos 400 m sobre el nivel del mar y, en su punto más elevado, unos 530m, para hundirse bajo la cobertura de sedimentos sueltos de la llanura costera donde, en algunos lugares, como al este de Arecibo, en el curso inferior del río de La Plata y en los alrededores del área metropolitana de la capital, constituye un karso enterrado (**merofósil** o, incluso, **holofósil**) con cuevas profundas, descubiertas en pozos paramétricos y que constituyen sectores de paleodrenajes subterráneos correspondientes a niveles de base inferiores al contemporáneo.

En la figura 3 se muestra dos perfiles de la región kárstica del norte, con información con los distintos componentes calizos que la forman, así como otra información relevante.

De la llanura emergen alturas residuales de rocas volcánicas, intrusivas o sedimentarias, rodeadas de depósitos jóvenes sueltos o secundariamente consolidados, la llamada "cobertura arenosa", formada en parte por arena de cuarzo.. Muchas de ellas son mogotes, algunos aislados, alargados (los pepinos de la literatura tradicional), o de contornos irregulares, como los de Vega Baja, Dorado, Toa Baja, Bayamón, Guaynabo y Loíza.

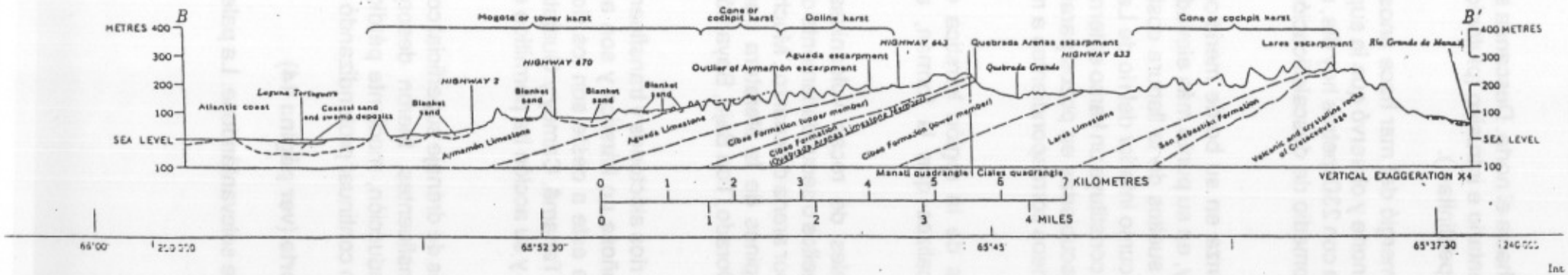
La cuesta es atravesada por una serie de ríos alóctonos y transfluentes, la mayoría de los cuales tiene su origen en el área montañosa no kárstica y son antecedentes al relieve actual. De ellos los más importantes de este a oeste son los ríos de La Plata, Cibuco, Grande de Manatí, Grande de Arecibo, Tanamá, Camuy y Guajataca, dos de los cuales tienen parte de sus cursos subterráneos y su acción ha permitido el desarrollo de notables paisajes fluvio - kársticos.

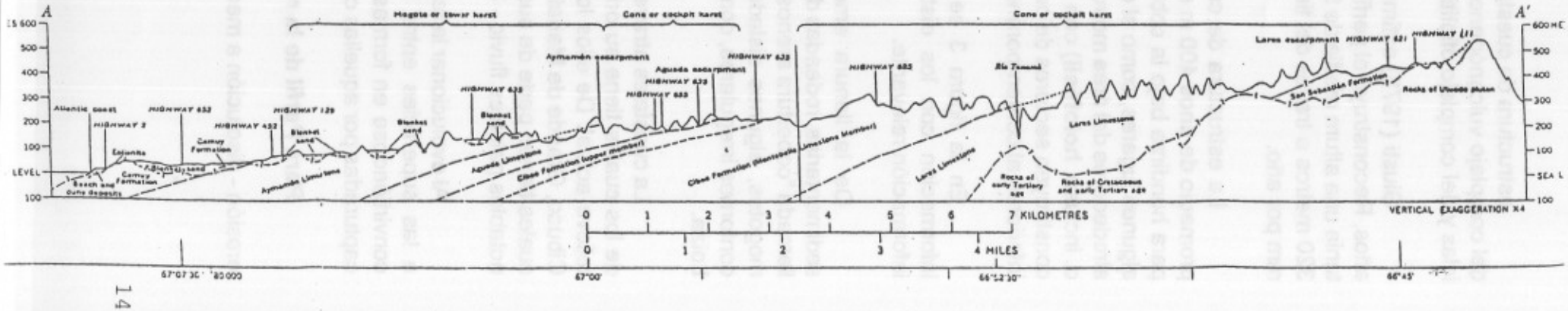
Al evolucionar la región, los paleosistemas de drenaje superficial correspondientes a las superficies entre los actuales ríos transfluentes, fueron desorganizándose y convirtiéndose en formas subterráneas de conducción, mediante pérdidas que fueron capturadas por aquellas corrientes que pudieron continuar profundizando sus cauces por

**Para Perfil de la region kárstica del norte (ver página 14)**

erosión - disolución a medida que el territorio fue solevantándose. La paleo-red de valles

# Perfil de la region kárstica del norte



está más desorganizada hacia el norte, hasta llegar a ser irreconocible en algunos lugares pero, al sur, todavía puede reconstruirse con bastante precisión.

Entre las formas y conjuntos de formas del relieve kárstico en esta región (karso litoral, llanuras fluvio-marinas acumulativas, alturas, pre-montañas e incluso algunas montañas bajas), podemos citar las siguientes:

- Escarpas de cuestas, orientadas latitudinalmente (de este a oeste) y asociadas a cambios **litoestratigráficos**;
- Elevaciones kársticas (mogotes y sierras calizas): karso cónico, karso cónico acantilado, karso de torres y sierras longitudinales;
- Complejos de elevaciones-depresiones (macizos) y de depresiones cerradas o semi-cerradas: karso de gallera, karso de dolinas, dolinas de disolución, dolinas de hundimiento o de colapso, uvalas y poljes;
- Valles y cañones fluviales (fluvio-karso): activos, ocasionales y abandonados;
- Zanjones y abras;
- Acantilados o contrafuertes fluviales o marinos;
- Cuevas: cuevas fluviales (y otras formas de conducción), furnias (pozos naturales), abrigos rocosos, cuevas al pie, cuevas marinas y
- Formas del micro relieve pavimentario (lapiés- lenar, karren, spikes, grykes o dientes de perro, orificios cilindroideos, tinajitas, acanaladuras, et.) y parietal (crestas, acanaladuras, etc.)

En la tabla 3 se presenta, de modo generalizado, la relación entre las principales unidades litoestratigráficas calizas de la región kárstica del norte y algunas de las formas y conjuntos de formas del relieve en esa área.

**Tabla 3.** Principales características de las unidades litoestratigraficas karstificables

| **región del norteUNIDADES** | **CARACTERÍSTICAS** | **EDAD** |
|---|---|---|
| FORMACIÓN CAMUY | Predominan calizas, pero contienen alguna arena. Parte baja creta o caliza cretosa con arena de cuarzo. Parte superior creta, caliza y arenisca calcárea. Espesor hasta unos 30m. Descansa disconforme sobre la subyacente | PLIOCENO INFERIOR (≈ 4 MA) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| CALIZA AYMAMÓN | | Caliza muy pura sin arcilla o arena. Dos miembros, el inferior, alterado, recristalizado y perforado por disolución, con permeabilidad secundaria; el superior es una caliza cretosa. Espesor 200 a más de 300m. Transicional sobre la subyacente. | MIOCENO MEDIO (≈ 15 MA) |
| CALIZA AGUADA | | Calizas fosilíferas. Parte inferior cretosa, parte superior calizas endurecidas casi puras. Potencia 100 a 120m. Transicional sobre la subyacente. | MIOCENO INFERIOR A MEDIO (≈ 24 A 15 MA) |
| | FORMACIÓN CIBAO | Arcilla calcárea interestratificada con caliza, arcilla arenosa, arena y grava. Tiene varios miembros calizos (Montebello, Quebrada Arenas y Río Indio). Espesor unos 220 a 320m. | OLIGOCENO TERMINAL A MIOCENO (≈ 26 A 20 MA) |
| | CALIZA LARES | Calizas de grano medio a fino con estratificación delgada a gruesa, parte inferior clástica con cuarzo y limonita. Lateralmente transiciona a la formación San Sebastián. Espesor 0 a 300m. | OLIGOCENO SUPERIOR (≈ 28 MA) |
| | FORMACIÓN SAN SEBASTIÁN | NO KÁRSTICA | |

**Tabla 4** Unidades litoestratigráficas calizas de la región kárstica del norte y algunas formas y conjuntos de formas del relieve con las cuales están relacionadas

| UNIDADES | RELIEVE |
|---|---|
| CALIZA LARES | Escarpas, macizos de elevaciones de karso cónico, zanjones, grandes cuevas. |
| FORMACIÓN CIBAO | Escarpas y crestas, karso cónico acantilado, dolinas y valles ciegos. |

| | |
|---|---|
| CALIZA AGUADA | Escarpas, karso de dolinas, karso cónico, cuevas cortas, arcos naturales y poljes pequeños. |
| CALIZA AYMAMÓN | Mogotes aislados y conjuntos de mogotes (karso cónico y de torres) furnias y cuevas cortas. |
| FORMACIÓN CAMUY | Escarpas de cuestas, sombreros en mogotes desarrollados en la formación Aymamón, furnias (de hasta 30m). |

Frecuentemente, aunque no exclusivamente, en el karso litoral de esta región, se encuentran rasgos fisiográficos producidos por deposición de carbonato de calcio que ha sido estudiado entre otros autores por Kaye (1959). Estos rasgos pueden ser de origen orgánico, como los arrecifes de coral y los depósitos de algas calcáreas y de anélidos calcáreos, o de origen inorgánico, como las dunas cementadas constituidas por eolianitas (calcarenitas eólicas), pavimentos constituidos por arenas de playa consolidadas, acumulaciones de calizas **oolíticas** y arrecifes de arenisca .

**El karso del Sur**

Una segunda región kárstica, la del suroeste, se extiende entre Ponce y Cabo Rojo; Es de carácter fragmentario, ocupa menor área y presenta relieves de otras características por razones litoestratigráficas, climáticas o, tal vez evolutivas. Por Cabo Rojo, entre otras, esta la cueva de Cofresí; en el área de Parguera también hay cuevas y el lapiés o diente de perro está bien desarrollado.

Cerca de Peñuelas se encuentran diversas cuevas, algunas muy extensas y hay grandes depresiones cerradas del tipo dolinas. En tramos de la costa el karso litoral está bien representado. Entre Juana Díaz y Ponce se localizan depósitos de caliche, considerado un rasgo secundario del karso, desde menos de uno hasta cuatro metros de potencia; su origen se atribuye por Monroe (1976) a la deposición en superficie por evaporación de agua que contenía bicarbonato de calcio en disolución.

El caliche, al igual que las costras superficiales de recristalización, cuya potencia depende de las características litológicas de la caliza, constituyen índices paleoclimáticos importantes para la explicación de la evolución del karso en Puerto Rico.

Al sur, entre Salinas y Villalba, se localizan afloramiento de calizas del Paleoceno y Eoceno, en las cuales se encuentran diversas cuevas, lo que se refleja en la toponimia, como en muchos otros lugares del país, pues el karso ha dado nombre a distintos sitios; al noroeste de Salinas hay un cerro de las Cuevas, que alcanza poco más de 300 m y, al sur de Villalba, hay otro cerro de las Cuevas que se alza hasta 638 m, donde se encuentra la cueva Lucero con petroglifos aborígenes, un karso ruiniforme impresionante y depósitos de travertinos ampliamente distribuidos en las laderas y que también constituyen

evidencias paleoclimáticas.

**Tabla 5.** Principales características de las unidades litoestratigráficas de la región kárstica del suroeste

| UNIDADES | CARACTERÍSTICAS | EDAD |
|---|---|---|
| CALIZAS PONCE | Calizas arrecifales que, en algunas partes, presentan en la base capas alternas de calizas y limolitas cubiertas por una capa masiva de caliza amarilla o blanca. Cubre discordantemente a la subyacente formación Juana Díaz, que también tiene algunas calizas. Potencia unos 120 m. Discordante sobre la formación Jícara y otras más antiguas (no kársticas). | PLIOCENO ( 10 A 5 MA) |
| CALIZAS CUEVAS | Calizas con fragmentos de granodioritas. Potencia unos 35 m, pero su patrón de afloramiento es ancho por fallamientos repetidos. | PALEOCENO Y EOCENO (≈ 62 A 50 MA) |
| CALIZAS SA GERMÁN | Calizas puras. Espesor 650 m. | CRETÁCICO SUPERIOR ( ≈ 100 MA) |
| CALIZAS PARGUERA | Calcarenitas glauconíticas de estratificación mediana a masiva. Espesor 300m. | CRETÁCICO SUPERIOR (≈ 100 MA) |
| Nota: También del Cretácico superior hay otras formaciones con calizas (Coamo, Cariblanco, partes del grupo Mayagüez). | | |

**Lentes kársticos dispersos**

Diseminados en la región montañosa no kárstica, se encuentran algunas áreas de rocas calizas, generalmente de Cretácico, que se explotan en canteras al este de Caguas, desde Cidra hasta Cayey. Entre ellas se localiza el sistema cavernario de Aguas Buenas, vinculado al río Cagüitas; también se localizan en Comerío, donde se encuentra la cueva de La Mora y Barranquitas.

**Tabla 6.** Algunas unidades litoestratigráficas calizas de la región montañosa no kárstica

| UNIDADES | CARACTERÍSTICAS | EDAD |
|---|---|---|
| VOLCÁNICOS FIGUERA Y | Unidades calizas locales y | EOCENO Y PALEOCENO |

| | | |
|---|---|---|
| FORMACIÓN FAJARDO | relativamente delgadas | |
| FORMACIÓN FRAILES | Miembro calizo Leprocomio del tope de la unidad y miembro calizo La Muda de la base. | CRETÁCICO SUPERIOR |
| BRECHA TORRECILLA | Miembro calizo Aguas Buenas de estructura lenticular, espesor hasta 60m. Color gris, grueso | CRETÁCICO INFERIOR |

**El karso de Mona y Monito**

Las islas de Mona (55 Km 2) y Monito (0.17 Km 2) al oeste de la isla de Puerto Rico, en el canal de la Mona, están constituidas exclusivamente por calizas y dolomitas. Fueron levantadas tectónicamente en el plioceno medio sobre el nivel del mar. Mona es una mesa o plataforma bordeada casi enteramente por acantilados verticales o subverticales y su superficie está erizada por campos de lapiés (dientes de perro). Su altitud máxima es de unos 100 m y se destaca la presencia de sumideros o dolinas, algunos como los de la Bajura de los Cerezos, El Corral y Cuevas del Centro conducen a cuevas.

El karso de Mona

Según datos de Kaye, 1959; Briggs y Seiders, 1972; Aaron, 1973 y González, 1999, la estructura de isla de Mona está compuesta por dos unidades litoestratigráficas: la Dolomita de isla de Mona, descrita como una dolomita bien endurecida, localmente con estratificación cruzada, de estratificación gruesa a muy gruesa, calcítica y finamente cristalina, de edad Mioceno inferior a medio, la cual está cubierta por la Caliza Lirio, descrita como una caliza cretosa y cavernosa, localmente con estratificación cruzada y capas finas a gruesas de grano fino.

La Caliza Lirio se depositó sobre una superficie de erosión desarrollada en la Dolomita isla de Mona, por lo que le atribuyo una posible edad Mioceno superior o Plioceno. La potencia máxima expuesta de la Dolomita isla de Mona es de unos 80 m a lo largo de los acantilados marinos septentrionales y la de la Caliza Lirio es de 40 m; no obstante, la estructura del fondo marino en las inmediaciones, de acuerdo a estudios de reflexión sísmica (Rodríguez et al., 1973), parece estar constituida por las mismas

litologías que las expuestas en la isla.

Al oeste y suroeste y, en menor medida al sureste, se encuentran terrazas constituidas por arrecifes de coral que de edad Pleistoceno (interglacial Sangamon).

Los sumideros o dolinas "... generalmente tienen de 4 a 10 m de profundidad; son predominantemente cilíndricos y, cuando elongados, siguen fracturas de tendencia noreste. Sus paredes son verticales y en la mayoría los fondos están agrandados en todas direcciones, pero no se extienden significativamente..." (González, 1991)])

Entre las cuevas más conocidas de la isla de Mona está cueva del Lirio en Punta Este; cueva de Espinar, con pictografías aborígenes, cerca de cabo Barrionuevo; cueva de Chito, en playa Los Pájaros; cueva Negra, junto a la Sardinera, con arqueología colonial y aborigen.

Algunas de estas cuevas se encuentran a más de 20 m por debajo de la superficie de la meseta, otras por el contrario, presentan muy poco espesor de la bóveda y están cerca de la superficie. Por lo general son planas y pocas superan los 400 m de longitud. González (op. cit.) dice: "Las cuevas a lo largo de los acantilados no se extienden más de 100 m bajo la superficie de la isla". Frank et al (1998) indica que por sus características morfológicas espeleogenéticas, la inmensa mayoría de estas cuevas se originaron al nivel de saturación por la acción corrosiva-disolutiva de aguas meteórico-marinas mezcladas infiltradas y son paralelas a los acantilados. Mylroie et al (1995) indica que a pesar de que hay cuevas con una superficie en exceso de 150,000 m2, la mayor penetración desde el borde de los acantilados es de 240 m.

Aunque las precipitaciones en Mona alcanzan más de 967 mm como promedio anual (Kaye, op. cit.), la combinación de una altísima evaporación, la acción constante de los vientos alisios y el inmediato drenaje a profundidad en el karso, dan por resultado en clima semiárido, aunque evidencias edafológicas y en los depósitos de las cavernas, muchos de ellos con fosforitas (casi todos explotados a finales del siglo 19 y a principios del siglo 20), parecen corroborar, también aquí los cambios climáticos que se han advertido en otras partes del territorio de Puerto Rico.

## Resumen histórico sobre la explicación de la formación de cavidadeso espeleogénesis

Casi todas las explicaciones que existen al presente sobre la formación de cavidades en roca caliza o espeleogénesis, ya había sido sugeridas antes del año 1900. Algunas fueron desarrolladas con bastante detalle. Espeleogénesis por erosión y el rol del dióxido de carbono en la disolución de los pasillos de las cavidades ya era comprendido en la primera mitad del siglo 19. Al final del siglo 19 ya existían escuelas de pensamiento que apoyaban la disolución por aguas vadosas y por aguas freáticas.

Muchas de las explicaciones para la espeleogénesis que se discutían para el siglo 19 hay que entenderlas dentro del marco de conocimiento que existía para la época y no debe de sorprendernos algunas de las explicaciones que se ofrecían. Existían explicaciones conflictivas como suele suceder con todas las ramas de la ciencia.

Resumiendo las distintas explicaciones para la espeleogénesis, las mismas se pueden agrupar de la siguiente forma:

1. hechas por el ser humano
2. contemporáneas con las rocas circundantes
3. por acción tectónica
4. por el diluvio bíblico
5. procesos de duración corta de erosión o disolución de materiales blandos y disolución en ácidos fuertes.
6. proceso lento de erosión de la roca caliza
7. disolución de la roca caliza

Muchas de estas explicaciones se tomaban como categóricas, y pretendían por si solas explicar como se formaban las cavidades, lo que en algunas ocasiones producía debates. Es importante resaltar que la gran mayoría de las explicaciones se daban en formas aisladas, cada uno en su propio país Europeo y muchas veces los contemporáneos desconocían los escritos de los demás. Poco a poco se va creando todo un cúmulo de información que intenta explicar la formación de cavidades. Eventualmente las mismas van pasando por el cedazo de las pruebas de los distintos estudiosos de las distintas ramas emergentes como la geología y geomorfología.

Ya a finales del siglo 19 se aceptaba que las cavidades se formaban por la acción del agua sobre la roca caliza aunque con enfoques distintos. Unos sostenían que las cavidades se formaban por la acción erosiva del agua de la misma forma como las corrientes de agua habían esculpido la topografía de la superficie. Para los que habían observado que la forma y tamaño desiguales de los pasillos y salones en las cavidades que tenían corrientes de agua o en aquellas cavidades sin corrientes de agua alguna, la explicación de la acción erosiva de agua no resultaba satisfactoria y sostenían que era la disolución el agente principal. Postulan que el dióxido de carbono en el agua crea un ácido débil y es el agente principal de la disolución de la roca caliza.

Aunque la teoría de disolución por agua agresiva, fue la mas aceptada no tuvo efecto directo en el entendimiento subsiguiente de la espeleogénesis. Lo que sí hizo fue enfatizar el hecho de que la disolución era la forma de explicar ciertas características de las cavidades.

A pesar de que existían explicaciones de disolución de la roca caliza por agua con dióxido de carbono y lo cual se podía observar en la formación de estalactitas, había una resistencia por parte de los que se oponían a esta explicación ante el hecho de la visión prevaleciente del tiempo que existía en el siglo pasado. No había una explicación

científicamente aceptada de la escala de tiempo y la que prevalecía era el dogma de la iglesia.

**Disolución por aguas vadosas**

Con los avances de la geología en el siglo 19, se plantea que la edad del planeta es de cientos de millones de años y hasta miles de millones. El geólogo, Charles Lyell plantea en el 1830, en Principios de Geología, "que el agua con el ácido carbónico, percolando a través de las grietas eran las responsables de las innumerables cavidades que contiene la roca caliza de su país y en otros países.

Martel ya finales del siglo 19 plantea: el agua vadosa que contiene ácido carbónico del aire es lo necesario para explicar la disolución progresiva de la roca caliza. Martel insistía que toda las cavidades formadas solo requerían de la acción del agua percolando a través de la roca (efecto químico) y de las corrientes subterráneas (efecto erosivo) y no aceptaba que existiese un nivel freático. No obstante lo anterior, su amplia experiencia en la exploración y estudio de las cavidades lo llevaron a concluir que no existe una teoría universal que pueda explicar el origen de las cuevas y que la explicación yace en una posible combinación de distintas teorías.

**Disolución por aguas freáticas**

Las explicaciones de cómo se habían formado las cavidades chocaban con las que no tenían evidencia de acción erosiva de corrientes y de disolución por aguas vadosas, particularmente cavidades con ciertas formas de los pasillos (morfología), su inclinación hacia cualquier lado y características de los techos. Varios estudiosos de cavidades no aceptaban que estas se habían formado por la acción de agua vadosa y planteaban sus propias teorías. Gradualmente se llego a la conclusión de que la disolución de la roca se origino cuando la misma estaba sumergida totalmente, en cuyo caso era responsable el efecto químico o de disolución solamente.

Ya para el 1900 existían tres teorías principales de espeleogénesis, cada una correcta en cierta medida dependiendo de las circunstancias. La teoría de la erosión, la teoría de la disolución y erosión (vadosa) y la de la teoría de disolución por el nivel freático. Cada teoría o escuela de pensamiento trataba de excluir a las demás y mantenían que su teoría era lo suficiente para explicar todos los casos y surgieron grandes controversias entre estas teorías. Gradualmente y en una forma muy lenta, en el transcurso del siglo 20, los desacuerdos se resolverían cuando se acepta que todos los procesos eran válidos, que operaban en combinación o sucesivamente dependiendo de las circunstancias locales.

**La espeleogénesis en el siglo 20**

La discusión de la espeleogénesis en el siglo se puede dividir en dos, una desde el 1900 hasta el 1957 y del 1957 al 1997. La primera mitad del siglo 20 continúa con la

discusión de las tres teorías principales con que termina el siglo anterior en dos escuelas principales de Norte América y de Europa del este. Geólogos y geomorfólogos, aplican métodos científicos modernos y refinaron ideas previas.

Conceptos previos del desarrollo de las aguas vadosas y freáticas fueron aceptados y extendidas, lo que a su vez estableció modelos parcialmente conflictivos y parcialmente complementarios. La hipótesis de estos modelos establecían que el desarrollo de las cavidades se producía en la parte superior, al mismo nivel y bajo el nivel de saturación (freático).

Las diferencias políticas y de idioma de los países Europeos entre si y de Norte América y el Reino Unido con los demás fue una barrera grande al intercambio de ideas y conocimientos. Jovan Cvijic, en el 1918 y uno de los pocos estudiosos del este de Europa cuyo trabajo fue traducido al inglés, tuvo amplia influencia. Planteó que hay tres zonas en orden descendiente: la zona seca, la zona de transición y la zona saturada. Cvijic planteó que la mayoría del agua subterránea se encuentra al nivel o por debajo de la zona de saturación y es en esta zona de transición donde se producirá el mayor desarrollo de cavidades.

Luego de Cvijic hay una gran cantidad de estudiosos que mantienen la controversia sobre el origen de las cavidades en las tres zonas distintas y algunos desarrollan modelos elaborados para el desarrollo del karso y las cavidades. Hay que destacar que F.F. Laptev, un ruso en el 1939, es el primero que explica el efecto de la como dos aguas saturadas de calcita pero con presión parcial diferentes en dióxido de carbono, produce una solución que es menos saturada, lo que le permite mas disolución de calcita. Este estudio no se conoció en la primera mitad del siglo 20 y fue algo que fue plantado por otro estudioso en el 1964, el cual desconocía el estudio de Laptev. Hubo una gran contribución al conocimiento durante esta parte del siglo 20 y similar a lo que sucedió a finales del siglo 19, nuevamente cada grupo sostenía que su teoría proveía la explicación para el origen de las cavidades, cuando en realidad la pregunta de esta etapa inicial de la espeleogénesis apenes fue considerada.

La segunda mitad del siglo 20, el énfasis cambia de los niveles de agua en las distintas zonas a estudios de los procesos y mecanismos del desarrollo de cavidades. Es interesante destacar que la Unión Internacional de Espeleología la cual fue creada en el 1953, contribuyó significativamente al intercambio de información de las distintas escuelas que sostenían distintas teorías.

Importantes cambios conceptuales fueron:

- Un renovado énfasis en los controles de los aspectos geológicos locales
- El reconocimiento de las cavidades como parte de la hidrogeología del acuífero de rocas carbonatadas
- Mejor y mayor conocimiento del equilibrio químico y **cinético** (lo que tiene el

movimiento por base o principio) **químico** de la disolución de las rocas carbonatadas.

## El desarrollo de cavidades y la interpretación geológica

Casi todas las teorías anteriores sobre la espeleogénesis carecían de detalles de la geología donde se ubicaba la cavidad. Una nueva visión es que las cavidades había que interpretarla a partir de la estratigrafía, la litología, la estructura y fisiografía local. La interpretación geológica ha sido asistida por una base de datos de descripción y mapas de cavidades producto de los grupos espeleológicos, los cuales no estaban disponibles para los estudiosos anteriores.

Los argumentos de sí las cavidades se formaban por encima, al nivel o por debajo del nivel freático quedó definitivamente contestado y la contestación es que si.

Un desarrollo importante es el descubrimiento de técnicas para obtener la edad absoluta mínima de los depósitos de formaciones secundarias en las cavidades, utilizando uranio/torio, lo que permite fechar hasta 350,000 años y hasta 500,000 con radio isótopos usando espectrómetros de masa. Otro método novedoso es el paleomagnetismo, la medida de las veces que los campos magnéticos de la tierra se han invertido, el cual queda fijado en los sedimentos clásticos. A través del mismo se ha logrado determinar la edad de una parte de la cueva Carlsbad, en 4 millones de años.

## Espeleogénesis y la hidrología kárstica

Los conceptos desarrollados por los estudiosos con respecto a la hidrología kárstica y su rol en la espeleogénesis fueron sumamente diversos y con muy poca convergencia. En cada país había una teoría particular. Entraron a discusión teorías de la mecánica de fluidos y algunos sostenían que la espeleogénesis estaba sujeta a misma. En el 1964 se comienza la Década Internacional de la Hidrología, la cual sirvió para focalizar la atención en la hidrología kárstica y comenzar a reunir las distintas teorías dispares que existían.

A pesar de que Martel había utilizado, en el 1913, tintes como trazador para establecer las conexiones subterráneas del agua, no fue hasta la segunda mitad del siglo que su uso se disemina y hay grandes avances en nuevos trazadores como los de carbón y otros que no requerían la presencia de una persona en el sitio. Surgen otros equipos que permiten el análisis cuantitativo de la información que proveen los trazadores y comienza a revelarse unos patrones de unos sistemas de conductos. Podía entonces analizarse el desarrollo de las cavidades como sistemas de drenaje integrado y no como fragmentos aislados. Basados en estos estudios comienza a definirse la divisoria de las cuencas que alimentan todo un sistema subterráneo.

Los estudios comienzan a demostrar que el agua que alimenta una corriente proviene de diferentes sitios y su grado de saturación química de calcita varia y las mismas no están saturadas. La cantidad de datos de los estudios aumenta con las

medidas con hidrógrafos y análisis continuo de la química del agua en los manantiales, lo que permite determinar además del volumen, como varia los niveles químicos con el volumen de agua.

El desarrollo de una cavidad es un proceso de fuga, el cual requiere de una evolución en el agrandamiento de las fracturas en la roca caliza, que exceda un punto de partida en cinética, que permita el inicio de turbulencia y el inicio del transporte de sedimento clástico. A pesar de ser independientes estos tres puntos de partida, se logra por coincidencia cuando la apertura de una fractura llega a aproximadamente un centímetro.

**Los procesos formativos de cavidades**

La inquietud con los mecanismos por el cual las fracturas y la separación de los estratos de las capas se agrandan hasta formar cavidades marcó el comienzo de la época moderna o científica de la teoría espeleogenética. A pesar de ello al igual que la interpretación geológica e hidrológica del desarrollo de cavidades, el proceso de espeleogénesis también tiene raíces que se extienden a los periodos anteriores. Estaba generalmente aceptado que la roca caliza era removida por la acción solvente del ácido carbónico y que mucho de la formación de la cavidad era resultado de la siguiente reacción: $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO^-_3$. A pesar de que era conocida la reacción química en los periodos anteriores se le dio poco uso. La solubilidad de la calcita, aragonita y la dolomita puede ser calculada como una función de la presión parcial del dióxido de carbono. Las curvas de las gráficas como resultado de estos cálculos permitían comprender la concentración de carbonato disuelto en aguas kársticas, en la deposición de los espeleotemas y en la tasa de descalcificación del karso. En los años 50 y 60 se usó extensamente la curva de solubilidad de la calcita como marco para determinar experimentalmente la composición de las aguas kársticas.

Una innovación en la segunda mitad del siglo 20 fue el uso de la química acuosa como medio interpretativo. Su aplicación a la geología permitió demostrar como muchas de las aguas kársticas están fuera de equilibrio, bajo el nivel de saturación en los manantiales kársticos y en las cavidades y sobresaturadas en las gotas de los espeleotemas. En el 1970 se calculó el índice de saturación (Langmuir, 1971) el cual demostró ser una herramienta útil, como lo fue el cálculo de la presión del dióxido de carbono de la química del agua kárstica.

Por bastante tiempo se sabía que el inicio y el desarrollo de los conductos era consecuencia de la cinética química (trata de la medida e interpretación de las velocidades de reacción como base cuantitativa de la reactividad química), y no del equilibrio. Algún mecanismo tenía que encontrarse que le permitiera al agua, bajo el nivel de saturación, penetrar profundamente en el acuífero de roca carbonatada. De lo contrario, cuando el agua entraba en contacto con la roca se produciría una reacción que la pondría en equilibrio. Habría formas superficiales de karso pero no habría cavidades.

Muchas investigaciones estudiaron la cinética de disolución de la calcita bajo diferentes condiciones experimentales y usando diferente coeficientes en las ecuaciones. No se lograba un acuerdo en los mecanismos de control de intensidad de disolución. Dos opiniones eran dominantes en los controles del transporte de masa por difusión: una laminar a través de la frontera de las capas y la otra reacción con la superficie. Un descubrimiento importante fue que la disolución de la roca caliza era una función no linear del nivel bajo saturación. La disolución procede rápidamente hasta que el agua kárstica llega a un índice de saturación de aproximadamente -0.3. Según la reacción del agua y la roca caliza va llegando a un punto de equilibrio, la tasa disminuye por varias ordenes de magnitud. Es esto, lo que permite la disolución que se produce en la parte profunda de un acuífero.

Para mediados de 1970 se comenzó a comprender que el desarrollo de las cavidades surge de la interacción de dos procesos – la velocidad con que el agua puede moverse a través de las fracturas y pasillos en desarrollo y a la velocidad con que la roca caliza se disuelve. Un modelo exitoso del desarrollo de cavidades tiene que combinar la dinámica de flujo con la cinética de disolución.

**Mecanismos alternos formativos de cavidades en rocas carbonatadas**

Estudios de la segunda mitad del siglo 20, reconocieron que existían otros mecanismos que daban origen al desarrollo de cavidades, tales como las zonas de mezcla (conocido en inglés como Halocline) de aguas frescas y saladas con carbonato, las aguas termales y el ácido sulfúrico.

En el caso de las zonas de mezcla de agua frescas y saladas con carbonato, opera el mismo mecanismo de producirse un nivel de saturación menor, lo que permite la acción de disolución. Este se produce mayormente en el karso costero, lo que ayudo a explicar las lagunas en Yucatán, México. Este tipo de disolución produce una morfología distinta en las cavidades.

Tanto el caso de las aguas termales (por lo general con un alto contenido en hierro) como el ácido sulfúrico (resultado de la oxidación de minerales sulfurosos – la pirita, pero principalmente de depósitos de petróleo) tienen la particularidad de crear cavidades de abajo hacia arriba, de muchos niveles y laberínticas.

**¿Que son y donde se forman las cavidades?**

El principal objeto de estudio de la espeleología, son las cavidades. Estas pueden definirse como espacios naturales subterráneos penetrables por el ser humano. Su definición es antropocéntrica, ya que hasta el momento solo aquellas cavidades que el ser humano puede explorar físicamente son las que se han estudiado. A las cavidades se le han dado muchos otras definiciones – cuevas, cavernas, grutas y otros, pero no existe un

consenso en cual es la diferencia entre estas, si alguna. Se acepta en el campo de la espeleología que una cueva es más pequeña que una caverna, pero nuevamente no hay definición categórica al respecto, de donde termina una y comienza la otra. Tampoco existe consenso sobre si una cavidad es solo aquellas donde hay oscuridad absoluta. Algunos grupos espeleológicos han decido que para que un espacio subterráneo sea una cavidad tiene que tener una cantidad mínima de metros, otras que tiene que tener oscuridad absoluta, etc., pero no existe una definición de consenso sobre estas definiciones. Mayormente el uso y costumbre local es el que ha determinado las definiciones, con lo cual hay que tener mucho cuidado cuando se leen trabajos de distintos países.

La karsología, de la cual forma parte la espeleología, es la ciencia que se ocupa de la descripción y explicación de la evolución de las regiones kársticas, entendidas éstas como ecosistemas, paisajes o complejos territoriales naturales de características peculiares.

Para que se desarrollen las regiones kársticas, y, en ellas, las cuevas, es necesaria la interacción de factores "activos", constituidos por aguas meteóricas (de lluvias) capaces de disolver y factores "pasivos", formados por rocas "solubles", condicionada por el conjunto de los componentes del entorno geográfico (relieve, suelos, vegetación, fauna y acción antrópica), a través del tiempo, con un ritmo o periodicidad particular.

Por lo general este proceso de interacción ocurre en territorios donde se encuentran calizas, calcarenitas, margas, dolomitas, mármoles y otras rocas carbonatadas o evaporíticas (salinas), como la sal y el yeso, bajo la acción de aguas enriquecidas con ácidos atmosféricos y orgánicos como el dióxido de carbono ($CO_2$) y, en menor proporción, nítrico, nitroso, húmico, fúlvico y otros.

Bajo condiciones especiales de lluvias torrenciales y temperaturas elevadas, también pueden desarrollarse fenómenos espeleogenéticos y karsogenéticos en rocas teóricamente insolubles, como los granitoides, los basaltos, los gabros, las serpentinitas, las cuarcitas y otras.

Los factores mencionados que controlan el desarrollo del karso y las cuevas no ejercen su influencia de modo uniforme.

El clima influye en mayor medida en el desarrollo del karso superficial, tanto de las formas grandes (mogotes y sumideros o dolinas), como de las pequeñas (lapiés o dientes de perro), pero menos en el de las cuevas.

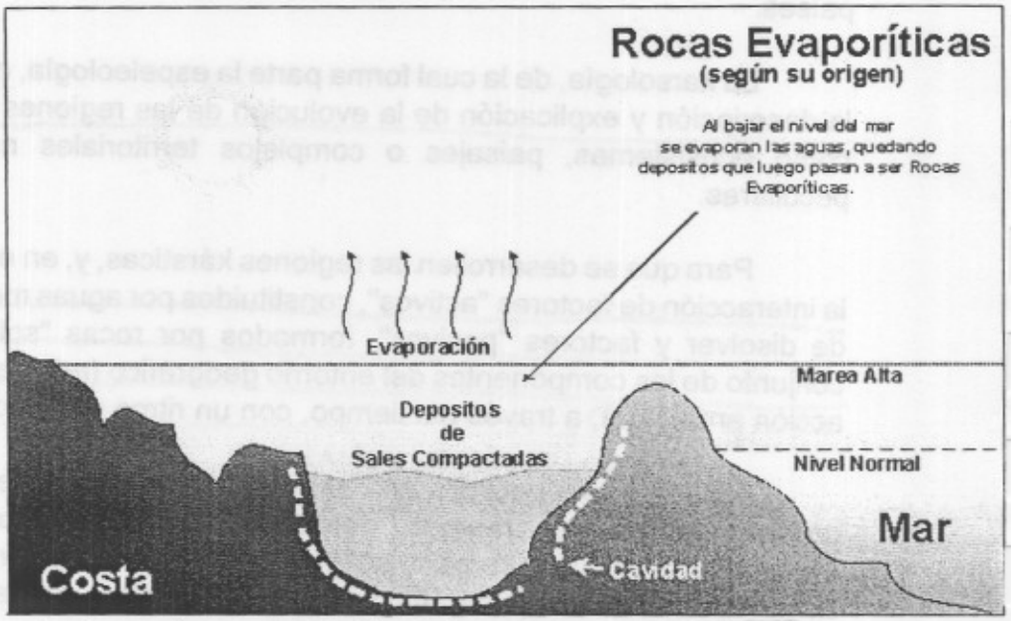
La situación espacial de las rocas (estructura, rumbo y buzamiento, relación con otras rocas) es fundamental en el origen y desarrollo de las cuevas, tiene una importancia media en el de las formas superficiales grandes y no es importante en el de las formas superficiales menores; el carácter de la roca (composición física y química, porosidad y permeabilidad) tiene poca importancia para el desarrollo de las formas superficiales

grandes y una influencia intermedia, tanto para las formas superficiales menores como para las cuevas.

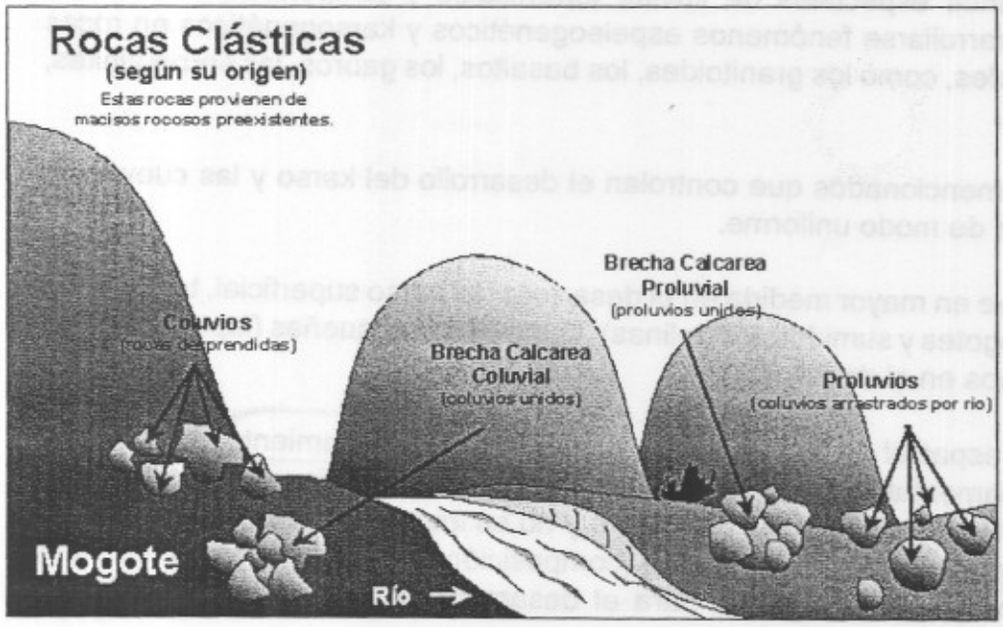
## FACTORES QUE DAN ORIGEN A LAS CUEVAS

### Rocas Carbonatas

Aunque hemos explicado que las cuevas pueden formarse en diversos tipos de rocas, como la inmensa mayoría se forma en las rocas carbonatadas, cuya composición mineral principal es el carbonato de calcio o calcita ($CaCO_3$), nos referiremos especialmente a ellas.




Existen algunos criterios básicos para la clasificación de las rocas carbonatadas, entre ellos el **origen**, la **composición mineral**, la **granulometría** y la **textura.**




Por su origen las rocas carbonatadas se clasifican en: a) **evaporíticas**, formadas en cuencas con circulación de las aguas restringida y fuerte evaporación que provoca la sobresaturación de las sales y su precipitación en el fondo; b) **biológicas**, constituidas por restos de animales como los corales; se distinguen

las biógenas (formadas fundamentalmente por restos fósiles bien conservados) y las biodetríticas (compuestas por fragmentos de organismos); c) **clásticas**, formadas por pedazos (clastos) de rocas carbonatadas preexistentes y d) **químicas**, constituídas por la precipitación del carbonato de calcio contenido en solución en las aguas, como las travertinas depositadas por los manantiales kársticos y los espelotemas que se encuentran en el interior de las cuevas.

Cuando se consideran, además de la calcita, otros minerales que componen las rocas carbonatadas, como la dolomita o carbonato doble de calcio y magnesio [$CaMg(CO_3)_2$] y los distintos tipos de arcillas, podemos dividirlas en dos grupos principales: las calcáreo-dolomíticas y las margosas, como se detalla en las Tablas 7 y 8.

**Tabla 7. Rocas calcáreo-dolomíticas**

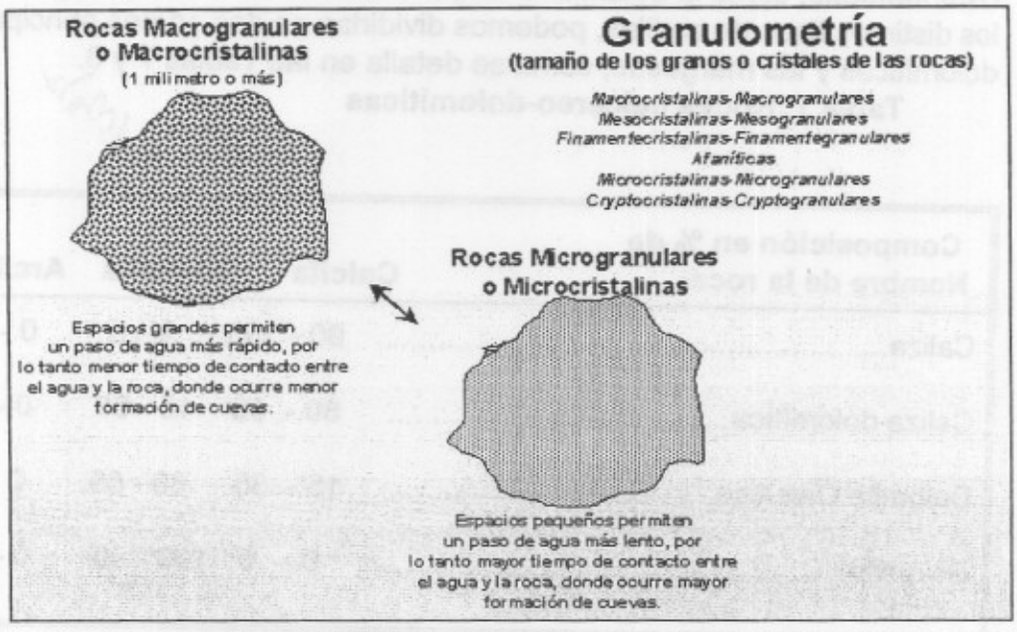
| Nombre de la roca | Composición en % de Calcita | Dolomita | Arcilla |
|---|---|---|---|
| Caliza | 90 - 100 | 0 - 5 | 0 - 5 |
| Caliza dolomítica | 80 - 65 | 15 - 35 | 0 - 5 |
| Dolomita Calcítica | 15 - 35 | 80 - 65 | 0 - 5 |
| Dolomita | 0 - 5 | 100 - 90 | 0 - 5 |

**Tabla 8. Rocas margosas**

| Nombre de la roca | Composición en % de Calcita | Arcilla |
|---|---|---|
| Marga calcárea | 95 - 75 | 5 - 25 |
| Marga | 75 - 50 | 25 - 50 |
| Marga arcillosa | 50 - 25 | 50 - 75 |
| Arcilla calcárea | 25 - 5 | 75 - 95 |
| Arcilla | 0 - 5 | 95 - 100 |

Aunque la identificación precisa de las rocas carbonatadas requiere trabajo de

laboratorio por especialistas, hay algunos criterios prácticos que permiten determinaciones preliminares en el campo. Por ejemplo, las dolomitas son las más resistentes al intemperismo; en general las calcáreo-dolomíticas son más duras (resistentes a un golpe dado con un martillo) que las margosas y, consideradas estas últimas, las más duras son las margas calcáreas. Si se les aplican unas gotas de ácido clorhídrico (C1H), también llamado comercialmente ácido muriático, diluido en una proporción de 5% del ácido en 95% de agua, la caliza reacciona violentamente con desprendimiento de hidrógeno, la marga calcárea también pero, a medida que en la composición de la roca aumenta la proporción de dolomita o de arcilla, la reacción se hace más lenta hasta el extremo de no ser afectadas por el ácido.




Como las rocas carbonatadas están formadas por cristales minerales, las cristalinas o por fragmentos, detritos o granos, las granulares, se pueden clasificar de acuerdo con el diámetro medio de sus componentes; incluso las rocas carbonatadas clásticas reciben nombres particulares de acuerdo con las dimensiones del material fragmentario que las compone, como se detalla en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. **Clasificación de las calizas y dolomitas por su granulometría**

| Nombre | Diámetro medio (mm) |
|---|---|
| Macrocristalinas o macrogranulares | 1.0 a más de 4.0 |
| Mesocristalinas o mesogranulares | 0.5 a 1.0 |
| Finamente cristalinas o finamente granulares | 0.01 a 0.05 |
| Afaníticas | menor de 0.01 |
| Microcristalinas o microgranulares | 0.001 a 0.01 |
| Criptocristalinas o criptogranulares | menor de 0.001 |

Tabla 10. **Clasificación granulométrica de las rocas carbonatadas clásticas**

| Nombre | Diámetro medio (mm) |
|---|---|
| Brecha o conglomerado | mayor de 10.0 |
| Gravelita | 1.0 a 10.0 |
| Arenisca | 0.1 a 1.0 |
| Aleurolita | 0.01 a 0.1 |

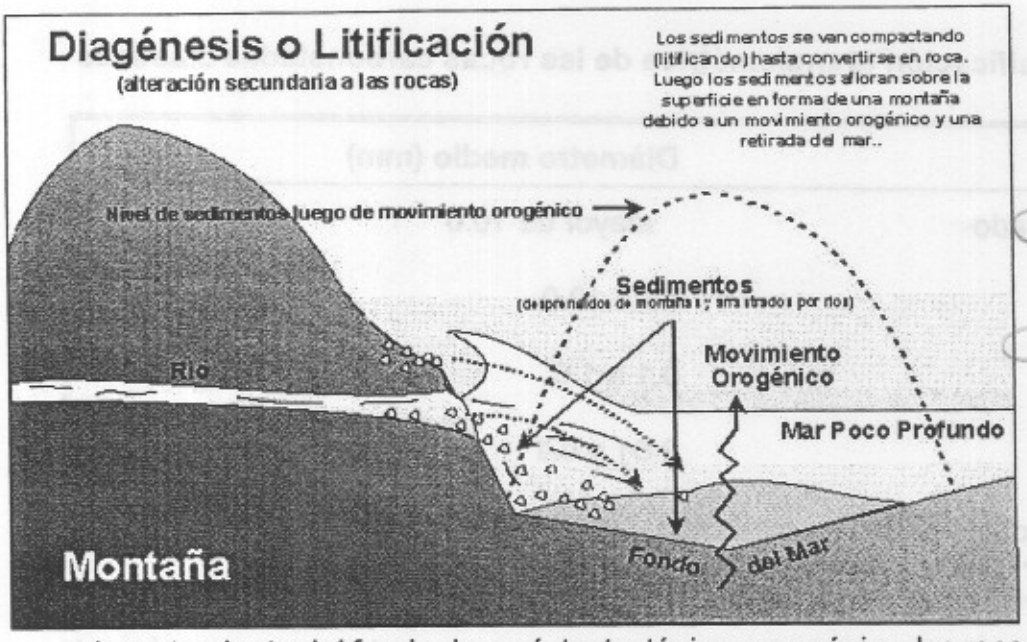
Nota: las brecas están compuestas por fragmentos angulares y los conglomerados por clastos redondeados u ovoides.

La **textura** es la apariencia general de una roca, sus características macroscópicas; en las rocas carbonatadas nos interesan la estratificación y la porosidad, ya que junto a las grietas y fracturas, son las vías por las que las aguas aciduladas penetran en los macizos para dar origen a las cuevas.

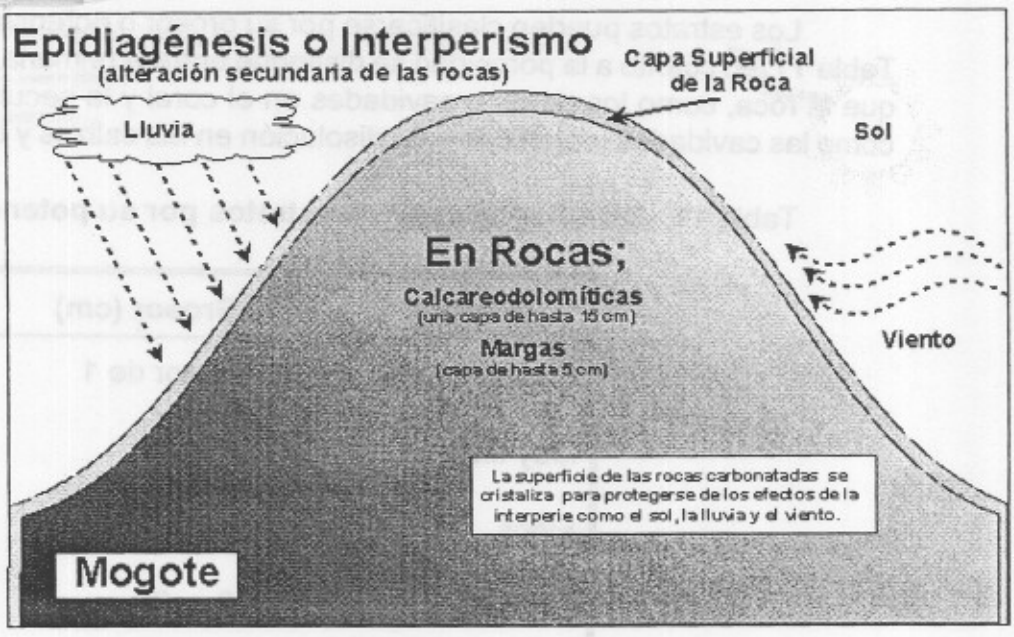
Los estratos pueden clasificarse por su grosor o potencia, como se presenta en la Tabla 11; en cuanto a la porosidad se distingue entre la primaria, formada al mismo tiempo que la roca, como los poros o cavidades en el coral y la secundaria, formada después, como las cavidades tectónicas o de disolución en las calizas y otras rocas carbonatadas.

Tabla 11. **Clasificación de los estratos por su potencia**

| Nombre | Grosor (cm) |
|---|---|
| Laminares | menor de 1 |
| Muy finos | 1 a 5 |
| Finos | 5 a 10 |
| Medios | 10 a 30 |
| Gruesos | 30 a 100 |
| Masivos | más de 100 |

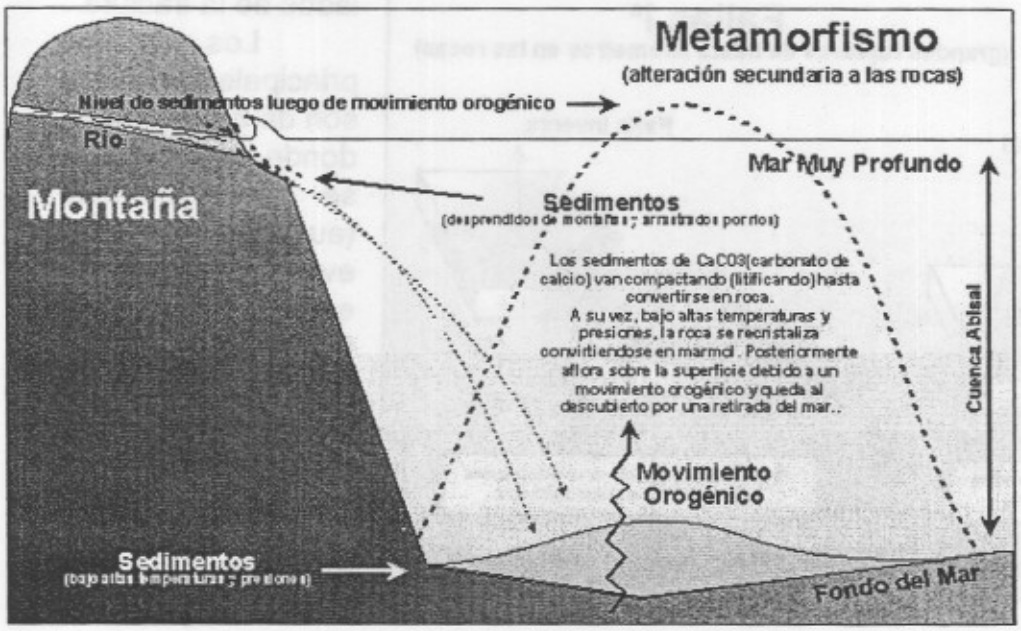



Las rocas carbonatadas tienen su origen en la lenta deposición en el fondo de una cuenca donde los materiales detríticos, los lodos y otros sedimentos se van endureciendo, litificándose o petrificándose mediante un proceso que los geólogos llaman **diagénesis.** Cuando se produce una **regresión** o retirada del mar o un levantamiento del fondo de carácter tectónico u orogénico, las rocas carbonatadas quedan expuestas a la acción de los agentes del tiempo o meteóricos (lluvias, cambios de temperaturas, vientos y otros) y experimentan un proceso denominado **intemperismo** y **meteorización;** este proceso puede conducir a cambios físicos y químicos en las rocas que constituyen la **epidiagénesis.**

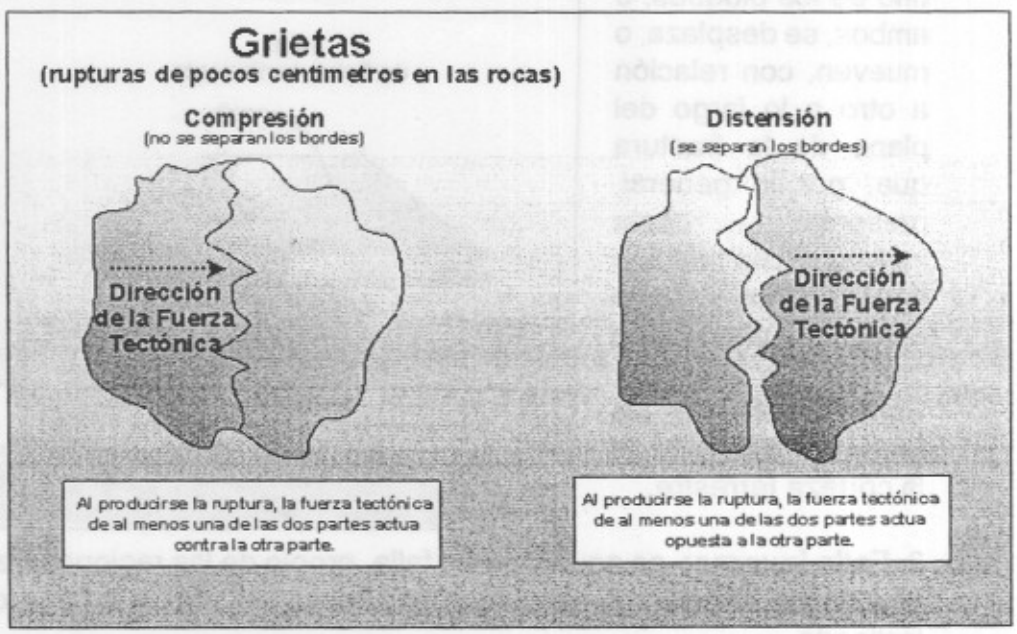



La disolución de las rocas carbonatadas y la formación de corazas o costras que endurecen la superficie de los carbonatos porosos son procesos de epidiagénesis que ocurren bajo la acción del intemperismo. La disolución conduce a la formación del relieve kárstico y de las cuevas, la formación de costras ocurre cuando la masa rocosa absorbe humedad de las lluvias y, al penetrar, disuelven carbonato de calcio pero, al evaporarse, lo abandonan cerca de la superficie dando origen a una corteza recristalizada que confiere resistencia al macizo.

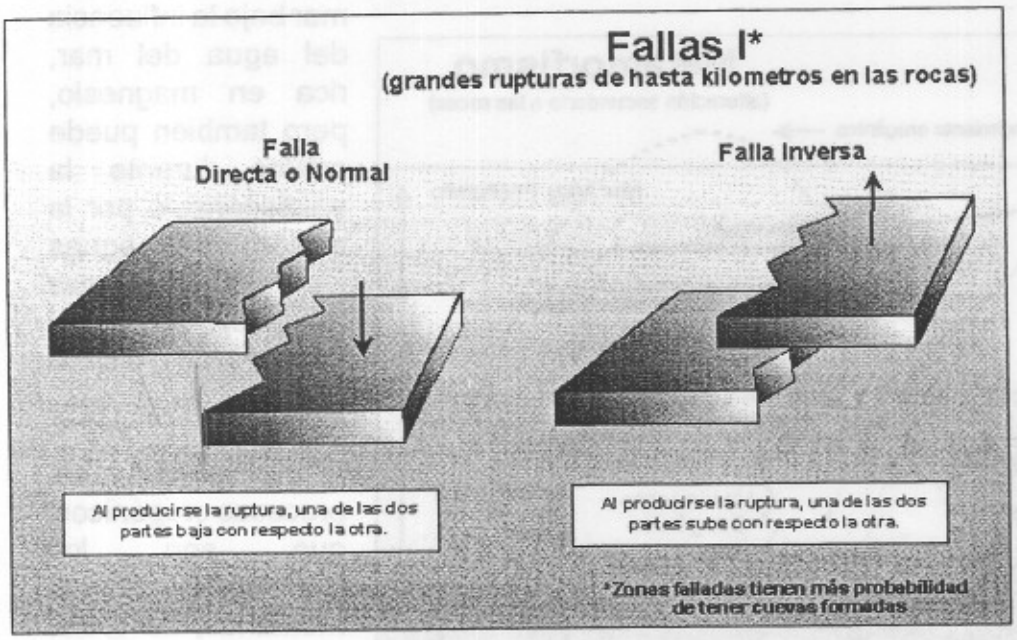
La dolomitización de las calizas puede ocurrir durante la diagénesis en el fondo del mar bajo la influencia del agua del mar, rica en magnesio, pero también puede ocurrir durante la epidiagénesis por la acción de aguas subterráneas magnesianas en el seno de los macizos rocosos.




Durante los procesos orogénicos, que son los formadores de montañas, las rocas pueden ser levantadas o hundidas, arrastradas o volcadas y son sometidas a fricciones, presiones, altas temperaturas, inyecciones de aguas termales, gases y hasta de rocas fundidas o pueden ser fundidas ellas mismas, total o parcialmente. Todos estos factores físicos y químicos conducen a la reorganización y transformación de los minerales que las constituyen e, incluso, a la creación de nuevos minerales. Estos son los procesos del **metamorfismo**, como por ejemplo, los que dan lugar a la transformación de las calizas, mediante la recristalización, la compactación y la formación de nuevos minerales en mármoles.




Los procesos orogénicos o tectónicos pueden dar lugar al agrietamiento o fracturación de los macizos de rocas carbonatadas, cuyas manifestaciones principales son las **diaclasas** o grietas sin desplazamiento de los bordes (o al menos, sin desplazamiento notable) y las **fallas**, donde sí ocurre un movimiento de

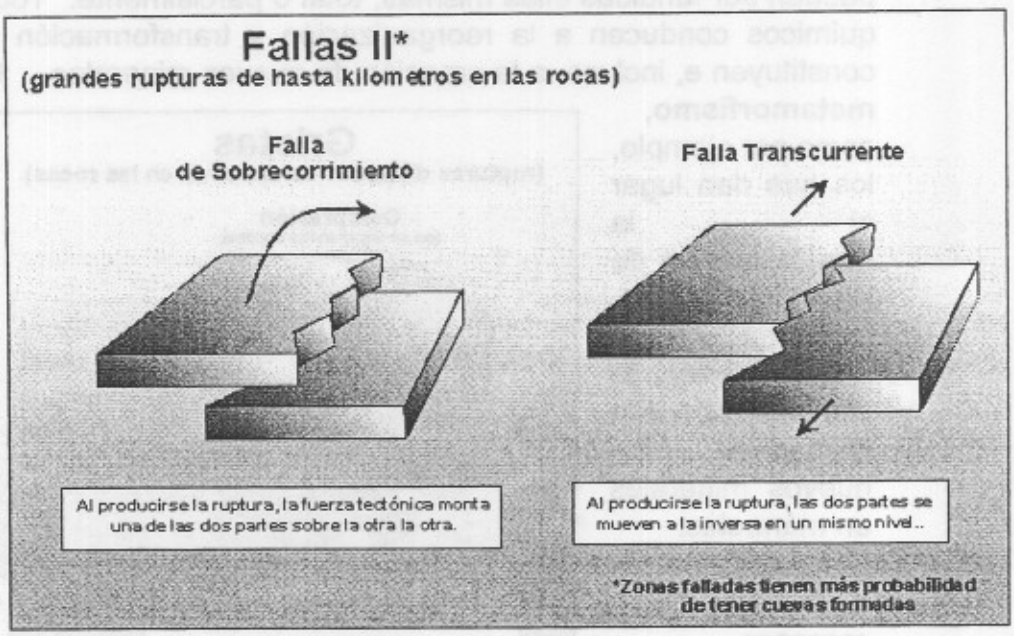



los bloques a ambos lados de la fractura.

Los dos tipos principales de grietas son de **compresión**, donde los bordes no se han separado (aunque a veces hay evidencia de que han experimentado cierta fricción) y las de **distensión,** donde la tectónica ha separado los bordes.

Los principales tipos de fallas, que se clasifican de acuerdo al comportamiento de los bloques a ambos lados del plano de la fractura, son los siguientes:

1. **Falla directa o normal:** es cuando uno de los bloques, o ambos, se desplaza, o mueven, con relación a otro a lo largo del plano de la fractura que, por lo general, presenta cierta inclinación en relación con la vertical y, como resultado, uno queda por debajo del otro. Son propias de las áreas de distensión de la corteza terrestre.




2. **Falla inversa:** es aquel tipo de falla, propio de las regiones de compresión, en el cual uno de los bloques se desplaza por encima del otro a lo largo de un plano de fractura inclinado.

3. **Falla de sobrecorrimiento:** también son propias de las zonas de compresión cortical; el plano de corrimiento está poco inclinado u horizontal y las fuerzas tectónicas hacen

cabalgar o arrastran uno de los bloques sobre el otro.

4. **Falla transcurrente:** es aquel tipo de fractura donde los bloques se desplazan lateralmente a lo largo de un plano vertical o poco inclinado sin que ocurran movimientos verticales notables.

En las figuras de la pág. 34 se muestran los principales tipos de fallas.

Las grietas y las fallas permiten la infiltración de las aguas aciduladas y de este modo, facilitan la formación del karso superficial y subterráneo **(espeleogenes);** por tanto, su estudio nos permite conocer las líneas preferenciales de disolución y las orientaciones principales del desarrollo de la cavidad y predecir en que dirección orientar los trabajos de investigación.

En los mapas topográficos, en las fotos aéreas y, a veces, sobre el terreno, algunos rasgos característicos permiten determinar la presencia de fallas, entre otros, los siguientes:

1. desplazamiento de estratos a un lado y otro de una fractura.

2. alineamientos de los cursos de ríos y quebradas, de las cadenas montañosas, sierras y mogotes, de las dolinas o sumideros, de las galerías de las cuevas y de los acantilados o escarpas.

3. cambios bruscos en la dirección de un cauce fluvial: río que serpentea y se torna recto o cambios angulares rectilíneos,

4. cambios bruscos en la pendiente de los ríos, con formación de rápidos y hasta de cascadas, y

5. límites lineales entre cuerpos geológicos de distinta composición.

En la pág. 37 se muestra los alineamientos los cursos del ríos y quebradas en

relación al sistema regional de fallas.

**Para alineamiento de los cursos (ver página 37)** –

## ¿Cómo se forman las cavidades?

### Aguas aciduladas, el factor activo

El agua es uno de los factores principales en la formación de las cavidades y de la topografía kárstica. La química nos ayuda a comprender que es lo que ocurre cuando el agua, cuyas moléculas son inestables y tienen facilidad de unirse a otras sustancias, al cambiar su composición, pueden disolver otros materiales. Es esta una de las razones por lo cual el agua es un disolvente universal. Nuestro análisis estara centrado en dos enfoques, uno general y uno especifico, de lo que ocurre en la naturaleza, con respecto a lo que permite la disolución de la roca caliza.

En el contexto general tenemos las nubes, las cuales están formadas por vapor de agua que, cuando se condensa, cae en forma de lluvia. Tan pronto como la lluvia ($H_2O$) comienza a caer, se une a gases de la atmósfera que encuentra en su recorrido, entre ellos el dióxido de carbono ($CO_2$), se produce una reacción química y se forma ácido carbónico ($H_2CO_3$), por lo que el agua se acidula y se vuelve **agresiva;** es decir aumenta su poder disolvente o de **corrosión.**

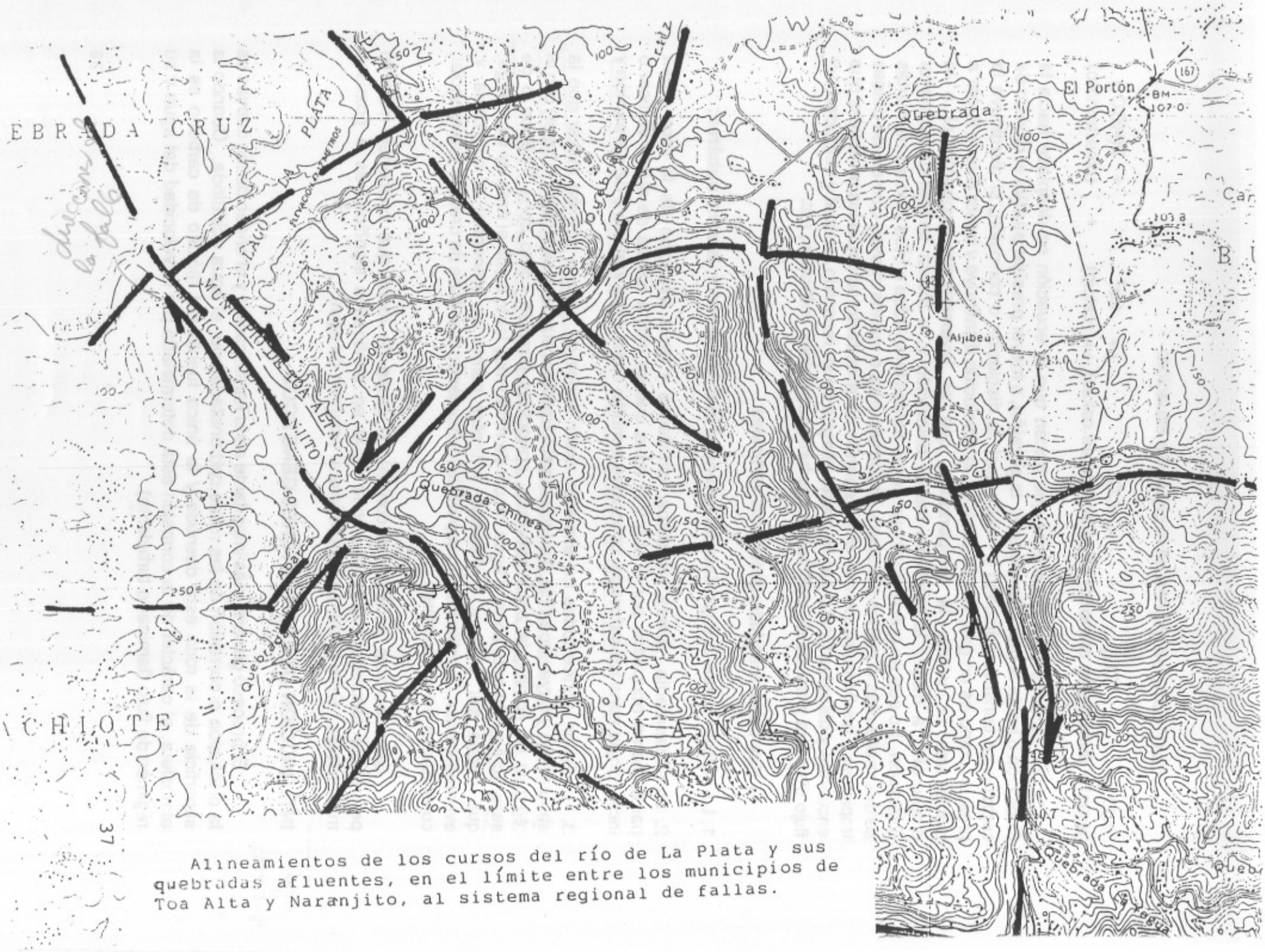
Cuando el agua de lluvia se precipita sobre el terreno **(P)**, una parte se evapora directamente o a través de la vegetación y demás seres vivos o **evapotranspiración ($E_v$);** otra parte fluye o se escurre por la superficie, **escurrimiento** o **escorrentía ($E_s$)** para formar corrientes fluviales y otra parte se infiltra **(I),** como se expone en la siguiente ecuación:

$$P = E_v + E_s + I$$

**Precipitación= Evapotranspiración + Escorrentía + Infiltración**

En las regiones kársticas el agua que se infiltra puede llegar a más del 40% del volumen total de las precipitaciones. Al ir percolando a través del suelo, en particular en los países tropicales por su rica vegetación, la agresividad del agua se incrementa con ácidos orgánicos tales como húmico, fúlvico, nítrico, nitroso y otros.

En el contexto especifico, tenemos la acción del agua acidulada sobre las rocas carbonatadas que produce una reacción de disolución o de corrosión de la calcita con formación de bicarbonato de calcio (en presencia del dióxido de carbono que, con el agua, forma ácido carbónico), o de otras sales solubles tales como sulfatos, nitratos y otras (en presencia de ácidos orgánicos), formándose las formas huecas en el karso, entre ellas los **espeleogenes** (cavidades subterráneas). Esta reacción es reversible y, cuando esto sucede, se produce la precipitación o deposición, formándose los depósitos **litoquímicos** como las costras de recristalización y los **espeleotemas** (estalactitas, estalagmitas y




Alineamientos de los cursos del río de La Plata y sus quebradas afluentes, en el límite entre los municipios de Toa Alta y Naranjito, al sistema regional de fallas.

otras), como se expone en la siguiente ecuación:

$H_2O$ + $CO_2$ + $CaCO_3$ ↔ $Ca^2$ + $2(HCO_3)$
(agua) + (bióxido de carbono) + (carbonato de calcio) ↔ (calcio) + (bicarbonato)

Los factores **(catalizadores)** que hacen que la ecuación se desplace hacia la disolución o hacia la precipitación son: la **presión,** a mayor **presión parcial** el dióxido de carbono se conserva disuelto y mayor será la disolución o corrosión; si disminuye la presión, como es un gas, puede escapar, la disolución disminuye y hasta puede llegar a precipitarse la calcita; la **temperatura**, que es inversamente proporcional a la disolución: a mayor temperatura menor disolución y, a menor temperatura, mayor disolución. Lo que no quiere decir que en los países templados o fríos y en las montañas se desarrolle más o menos el karso y se formen más o menos cuevas que en los países tropicales y las llanuras, porque esto depende de otros factores como los minerales que encuentra y disuelve total o parcialmente el agua en su recorrido, caudal y velocidad del flujo del agua a través de distintas zonas hidrogeológicas verticales, etc.

Hay tres zonas hidrogeológicas verticales:

1. La primera sobre la superficie del terreno al aire libre exterior, la zona **subárea;**

2. otra intermedia, donde los poros, cavidades y otros espacios de la roca están parcialmente ocupados por el aire y el agua que se infiltra circula de modo vertical o inclinado, la zona **no saturada**, conocidas también como zona **vadosa** o de **aereación** y

3. la inferior, donde todos los espacios están llenos de agua a presión mayor que la atmosférica y cuya superficie, llamada **manto freático**, puede oscilar (subir o bajar) con el régimen de lluvias, la zona **saturada,** conocidas también como zona **freática** o de **saturación.** En esta zona el agua circula de modo muy lento hacia el área de **descarga**, que puede ser puntual o dispersa y brotar como un manantial o surgencia y, eventualmente, constituir un río superficial o, siguiendo una línea de drenaje preferencial, constituir un río subterráneo.

Se denomina **acuífero** al conjunto o grupo de rocas que contienen material permeable saturado capaz de rendir agua en cantidades significativas a pozos y manantiales. Este término no se refiere al volumen de agua.

Aquí
16-Oct-02
↓

## INTERACCION DE LOS FACTORES GENETICOS

El proceso general más importante en la karstificación y el origen de las cuevas es la disolución o corrosión de las rocas carbonatadas por el agua acidulada. Cuando la superficie de la roca está desnuda y la única fuente del dióxido de carbono es la atmósfera, el carácter de la corrosión está determinado por la velocidad del agua y su régimen de flujo (laminar o turbulento).

Cuando las rocas carbonatadas están cubiertas parcial o totalmente por suelos, vegetación, etc., que aportan mayor cantidad de dióxido de carbono e, incluso, otros ácidos, la corrosión se acelera. Los principales tipos de **corrosión acelerada** son los siguientes:

1. **corrosión bioquímica,** se produce por la presencia de microorganismos cuando el agua pasa a través de suelos, por el interior de las cavidades e, incluso por la zona hidrogeológica saturada,

2. **corrosión subaluvionar,** ocurre cuando el agua circula a través de una cobertura permeable (de bloques, derrubios y suelos, con o sin vegetación) y forma una capa hidrogeológicamente saturada, muy agresiva químicamente, que provoca una intensa corrosión en las rocas carbonatadas y origina dolinas, redes de conductos y hasta lapiés ocultos. En áreas donde la cobertura pueda haber desaparecido por la erosión, hay que considerar esta posibilidad para explicarnos la génesis de los rasgos morfológicos.

3. **corrosión autóctona,** se origina cuando el agua se infiltra a través de una cobertura sedimentaria pero no llega a formar una capa saturada; actúa preferentemente, como la **subaluvionar,** sobre el fondo de las depresiones.

4. **corrosión de borde,** es la que se produce en los límites de las formas kársticas negativas (valles ciegos, dolinas, uvalas y poljes); es muy intensa sobre todo en los climas tropicales y subtropicales y conduce a la expansión lateral de tales depresiones.

5. **corrosión por mezcla de aguas,** ocurre cuando dos masas de agua, incapaces ya de continuar disolviendo carbonato de calcio individualmente, se mezclan y recuperan la agresividad. Este proceso puede ocurrir en cualquier confluencia de corrientes, en la superficie o en las zonas hidrogeológicas no saturada y saturada, lo que explica en parte que los salones de las cuevas se encuentren en la unión de galerías.

6. **corrosión por aguas de condensación**, se produce cuando el vapor de agua se condesa en las cavidades y se hace agresivo con el dióxido de carbono atmosférico; da lugar a corrosiones localizadas.

7. **corrosión por oxidación-reducción**, se produce cuando las aguas infiltradas entran en contacto con minerales como la pirita (FeS) y se forman ácidos (□como el sulfúrico) que intensifican la corrosión.

8. **corrosión reogénica**, (del griego **rheos**, corriente), es la determinada por el tipo de flujo, que puede ser laminar (en capa), turbulento, turbillonar (agitado y violento, con remolinos), etc. Este tipo de corrosión da lugar a la serie de espeleogenes que, en su conjunto, se denominan "huellas de corrientes", formados por el flujo hídrico subterráneo, tales como los pendientes estructurales, los **scallops,** las campanas de disolución, los

huecos espongiformes, los tubos y canales **anastomosados** y otros.

**El proceso de disolución químico**

La química es la ciencia que estudia la naturaleza, propiedades y composición de las sustancias, las reacciones que tienen lugar entre ellas, así como las leyes, principios y teorias que las interpretan. Las sustancias a su vez es la materia de la que se constituyen los cuerpos. La química se encarga de estudiar y explicar cosas como la solubilidad, reacciones de ácidos con bases y equilibrio de procesos entre otras cosas. La disolución de las rocas carbonatadas es un proceso químico, el cual trataremos de explicar en una forma más amplia y de la cual depende en parte la espeleogénesis. En la parte de **Aguas Aciduladas, el factor activo** se analizó en forma amplia la disolución, ahora pretendemos conocer un poco mas sobre la disolución en sí.

La solubilidad es una propiedad de las sustancias que permite formar mezclas homogéneas a nivel molecular con otras sustancias. Es cuan bien una sustancia se mezcla con otra. Hay factores que determinan la solubilidad, el primero es la tendencia natural de las sustancias a mezclarse o visto de otra forma a desordenarse. Pero no todas las sustancias se mezclan indefidamente y existen unos factores que limitan la solubilidad como las fuerzas de atracción relativas que existen entre si. Si la fuerza de atracción que tiene una sustancia en si misma es mayor que la que tiene otra sustancia, esta no se disolverá. Sustancias con fuerzas de atracción parecidas se disolveran entre si.

El agua está compuesta de dos hidrógenos y un oxígeno, por eso su fórmula química $H_2O$. Para que dos elementos puedan unirse tienen que compartir sus electrones y en esta unión entre el oxígeno y el hidrógeno, el oxígeno se apropia más fuertemente de los electrones del enlace, quedando parcialmente negativo y el hidrógeno al perder electrones queda parcialmente positivo. Un principio es que cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen, razón de las fuerzas atractivas que existen entre las moléculas de agua. Cualquier sustancia que pueda entrar en este arreglo de cargas podrá disolverse en el agua.

Además de la tendencia de ciertas sustancias a mezclarse, estas mezclas producen unos compuestos que pueden ser ácidos o bases. Un ácido es un compuesto que al disolverse en agua, aumenta la concentración de iones hidrógeno ($H^+$), que es capaz de formar sales por reacción con algunos metales y con las bases, y que puede ceder protones. Base son compuestos que al disolverse el agua aumenta la concentración de iones de hidroxilo ($OH^-$) y que puede captar protones. Un ión es cuando un átomo o agrupacione de átomos que han perdido o ganado uno o más electrones. La sustancia fundamental en ambos casos es el agua ($H_2O$). Existen ácido y base fuertes los cuales reaccionan totalmente con el agua y débiles que no reaccionan totalmente con el agua.

En la naturaleza las sustancias tienen un estado de equilibrio, el cual se puede

alterar bajo ciertas condiciones y por ciertos periodos de tiempo, pero las mismas tienden a volver a su estado de equilibrio. Factores que afectan el equilibrio son: temperatura, presión, las diferentes sustancias envueltas y la cantidad de estas y otros. Las flechas en las fórmulas químicas expresan la dirección del equilibrio y los factores antes mencionados afectan la velocidad con que se producen estos cambios. Veamos como todo lo anterior nos ayuda a entender el proceso de disolución de la roca caliza.

La roca caliza ($CaCO_3$) o dolomita $CaMg(CO_3)_2$ en agua ($H_2O$) neutral son poco solubles. Por si solo esta agua neutral no seria suficiente para la disolución de la roca caliza. Hay un elemento adicional que se se le añade al agua para disolver la roca caliza y esto es el bióxido de carbono ($CO_2$). Cuando el agua ($H_2O$) en forma de lluvia pasa por la atmósfera entra en contacto con el bióxido de carbono ($CO_2$) y se mezcla formando ácido carbónico ($H_2CO_3$), un ácido debil, el cual tiene la capacidad de disolución de la roca caliza ($CaCO_3$). El agua acidulada de lluvia, adquiere mayor acidez cuando entra en contacto con la materia orgánica que se está descomponiendo en el suelo. Esto explica la razón de que las aguas aciduladas en el trópico sean más ácidas que en paises templados. Como mencionaramos la temperatura es un factor que afecta el equilibrio, y a una temperatura más baja la tasa de disolución es mayor que a una temperatura más alta, pero la tasa de disolución en los trópicos es mayor por la materia orgánica que proviene de la vegetación . El otro factor que es importante es la presión y siendo el bióxido de carbono ($CO_2$) un gas tendremos que a mayor presión, más gas y a su vez mayor presión. Recordemos que en la naturaleza los compuestos químicos, trataran de volver a su punto de equilibrio, cuando estén las condiciones apropiadas.

El cuadro completo de la interacción es:

$CO_2$ (bióxido de carbono – un gas) + $H_2O$ (agua de lluvia) $\rightarrow$ $H_2CO_3$

$H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$ (equilibrio ácido – base)

$H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow HCO_3^-$ (equilibrio ácido – base)

$CaCO_3 \rightarrow (Ca)^{2+} + (CO3)^{2-}$ (equilibrio solubilidad)

Esta ecuación química representa el proceso de disolución en una forma simple. En la naturaleza convergen multiples otros factores en el proceso de disolución, pero en algún momento buscando el equilibrio, la calcita disuelta se precipitará para formar espeleotemas dentro de la cavidad o sera transportada al exterior de la misma.

## CLASIFICACIONES ESPELEOLOGICAS

Las cavidades subterráneas han sido clasificadas y denominadas de muchas maneras distintas pero, el término "cueva", es el más usado y el que tiene un significado más popular y amplio. A continuación mencionaremos algunas clasificaciones.

## Clasificación espeleométrica

Consideradas por sus dimensiones, en particular por su longitud, pueden ser:

1. **Abrigo rocoso,** cuando la cavidad deja espacio para guarecer a un humano o grupo de éstos.

2. **Gruta,** cuando se trate de un salón subterráneo.

3. **Cueva,** se refiere a una cavidad formada por varios salones y galerías hasta un largo total que no exceda un kilómetro.

4. **Caverna,** cuando las galerías y salones pasen de un kilómetro y no excedan de diez.

5. **Gran Caverna,** las galerías y salones pasan de diez kilómetros de desarrollo total.

6. **Sistema subterráneo,** cuando se trate de cavidades abiertas en una región kárstica y que posean unidad geológica y geomorfológica, a veces sin comunicación subterránea.

7. **Cuenca con cauces y galerías subterráneas con o sin comunicación,** cuevas y ríos subterráneos originados por un río principal y sus tributarios en una cuenca fluvial con zonas kársticas.

Para algunos especialistas el término "caverna" tiene un significado genético y no espeleométrico: cualquier cavidad **no natural**, o que **no sea penetrable por el hombre,** o que aún siéndolo, **no tenga zona de oscuridad**; también debemos señalar que algunos autores prefieren considerar los casos 6 y 7 anteriores bajo la denominación común de **Sistema cavernario.**

## Los problemas en la clasificación genética

Antiguamente se utilizaba una clasificación que intentaba organizar las cuevas por

su origen. A medida que se fueron realizando estudios en todas las latitudes, como vimos en la parte de **Perspectiva historica sobre la explicación de la formación de cavidades,** se tropezó con la realidad de que cada cueva tiene un origen complejo e individual y se fue complicando la clasificación hasta que fue haciéndose muy difícil su aplicación y muy discutible sus resultados.

Con el desarrollo de la ciencia, no sólo los términos que utilizaba fueron haciéndose obsoletos, sino hasta la propia teoría que los sustentaba. Esta clasificación pretendía atribuir origen "vadoso" a cuevas verticales; "freático" a las horizontales, "fluvial" a las que parecían "tubos"; "marino", a las inmediatas al mar o que éste había actuado en su formación y "tectónico" a las vinculadas a fracturas o grietas, por sólo mencionar algunos ejemplos.

El problema fue surgiendo cuando se descubrieron "cuevas freáticas verticales", o la complejidad genética fue llevando a resultados tan desconcertantes que se les aplicaban apelativos como : "fluvio-freato-vadosa", "freato-marina-fluvial", "tectónico-vadosa-marina", etc. y, para acabar de complicarla aún más, se fueron inventando nuevos "tipos" y "clases" cada vez que se estudiaba una cueva y se le fueron aplicando, además, los nombres de cada cueva estudiada y, cada grupo espeleológico, o cada autor, inventaba el suyo o los suyos.

Por otra parte, y con otros objetivos, fue desarrollándose una **tipología** (no una "clasificación") basada en evidencias, rasgos o características hidrogeológicas y geomorfológicas que se pueden ver y comprobar en las cuevas (no en deducciones teóricas), que no responde a características determinadas en una o varias cuevas típicas, sino que es aplicable a distintos sectores de una misma cavidad de grandes dimensiones y, mediante su combinación, puede describirse cualquier cavidad kárstica. Se trata de un instrumento de investigación para facilitar el estudio de las cuevas y no para "encasillarlas".

## TIPOLOGIA DE LAS CAVIDADES KARSTICAS BASADA EN SU FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO Y SU GEOMORFOLOGIA

### I. SEGUN SU HIDROGEOLOGIA

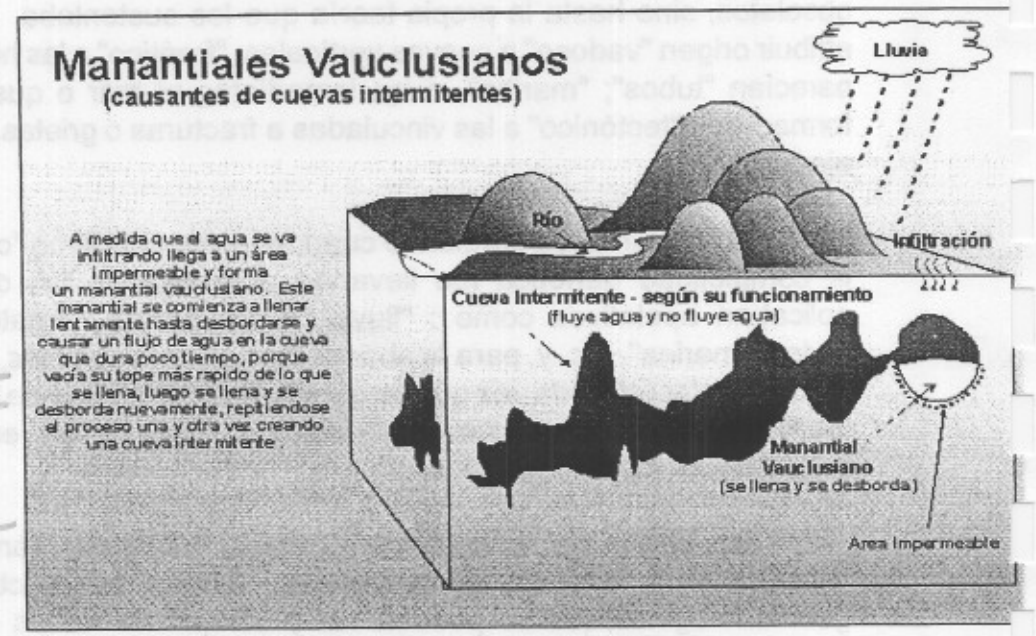
Según el funcionamiento de la cavidad

Se atiende al carácter del flujo hídrico a través de la cavidad considerado en el tiempo y se subdivide como a continuación se expresa:

- **permanentes,** incluye aquellas cavidades por las que fluye agua durante todo el año, como los cauces subterráneos vigentes;
- **intermitentes,** son cuevas por donde el agua corre y deja de fluir en forma alterna,

como ocurre con las fuentes o manantiales kársticos vauclusianos de algunos ríos y arroyos;

- **estaciónales,** comprende cavidades que drenan las aguas durante la época de lluvias, como los cauces subterráneos de los arroyos estaciónales que dejan de correr en época de seca;




- **ocasionales,** son cuevas ocupadas excepcionalmente por las aguas durante grandes lluvias; es decir, niveles de inundación, situados por encima de los cauces subterráneos vigentes de los ríos subterráneos. También pueden incluirse aquí aquellos conductos que drenan los macizos después de cada aguacero, como ocurre con los manantiales ocasionales;

- **inactivas,** aquellas cavidades por las cuales no fluye agua, al menos en cantidades apreciables en ninguna época del año. Entre estas cavidades podemos distinguir las **seniles**, que se encuentran parcialmente rellenadas por los procesos clásticos y reconstructivos, y las **fósiles**, que están total o casi totalmente rellenadas (fosilizadas) por dichos procesos, como las que aparecen en las canteras, colmatadas por materiales microclásticos o litoquímicos.

Según el origen del caudal

Se considera si el agua que fluye por la cavidad procede del área misma donde se encuentra la cueva, o si tiene su origen en una región impermeable situada fuera:

- **autóctonas,** cavidades por donde fluye el agua producida por las precipitaciones que han caído sobre el macizo kárstico;

- **alóctonas,** cavidades por donde corre agua procedente fundamentalmente de fuera del macizo kárstico, casi siempre por su pequeña superficie;

- **mixtas**, cuevas por donde fluye agua en parte de fuera del macizo y en parte precipitada directamente sobre él.

## II. SEGUN SU GEOMORFOLOGIA

### Formas de conducción

Según su disposición espacial en la estructura

- **predominantemente horizontales,** cuevas sin grandes desniveles o sólo con escalones locales;
- **predominantemente verticales,** furnias o pozos naturales;
- **inclinadas,** su perfil es inclinado por encontrarse en regiones montañosas o, por razones estructurales, seguir planos de estratificación o grietas inclinadas.

Según la morfogénesis de la cavidad

- **directas,** generadas por la acción erosivo-disolutiva de las aguas aciduladas al penetrar o atravesar el macizo kárstico directa o gravitacionalmente. Se subdividen en:

  1. **absorbentes**, sumideros (**ponores o sink-holes)** formados donde el agua penetra en el macizo;
  2. **transfluentes**, formas tubulares que perforan los macizos de un lado al otro;
  3. **emisivas**, formas originadas donde el flujo hídrico abandona el macizo kárstico, como las surgencias o resolladeros;
  4. **de minado lateral**, cuevas al pie de la ladera, formadas por corrosión lateral en el contacto entre dos litologías, por la acción de una corriente fluvial o por aguas agresivas lacustres o de pantanos.

- **inversas,** originadas por "erosión inversa", es decir, de abajo hacia arriba, desarrolladas en profundidad a partir de cavidades embrionarias verticales en forma de huso que, eventualmente, pueden llegar a abrirse a la superficie. Pueden ser:

  1. **simples**, formadas por una cavidad fusiforme. Atendiendo a la forma de su sección se subdividen en **tectónicas,** cuya sección es angular y está controlada casi exclusivamente por el agrietamiento de la estructura, y **semitectónicas;** cuya sección es circular o subcircular y está controlada,

tanto por el grietamiento, como por los procesos erosivo-disolutivos; estas últimas se consideran **isoclásicas,** cuando el alargamiento de la sección

coincide con el sistema de diaclasas predominante, y **heteroclásicas,** cuando la sección es aberrante;

2. **compuestas**, formadas por más de una cavidad fusiforme y son de desarrollo complejo. Se subdividen en **homogéneas**, constituidas por más de un huso, a veces de tamaños diversos, pero de igual naturaleza, y **heterogéneas,** formadas por varios husos unidos por coalescencia, mediante seudo galerías cuya planta es bastante compleja;

3. **mixtas**, incluye las cavidades kársticas que presentan características morfogenéticas producidas por la combinación de los factores que dan origen a las **directas** y a las **inversas.**

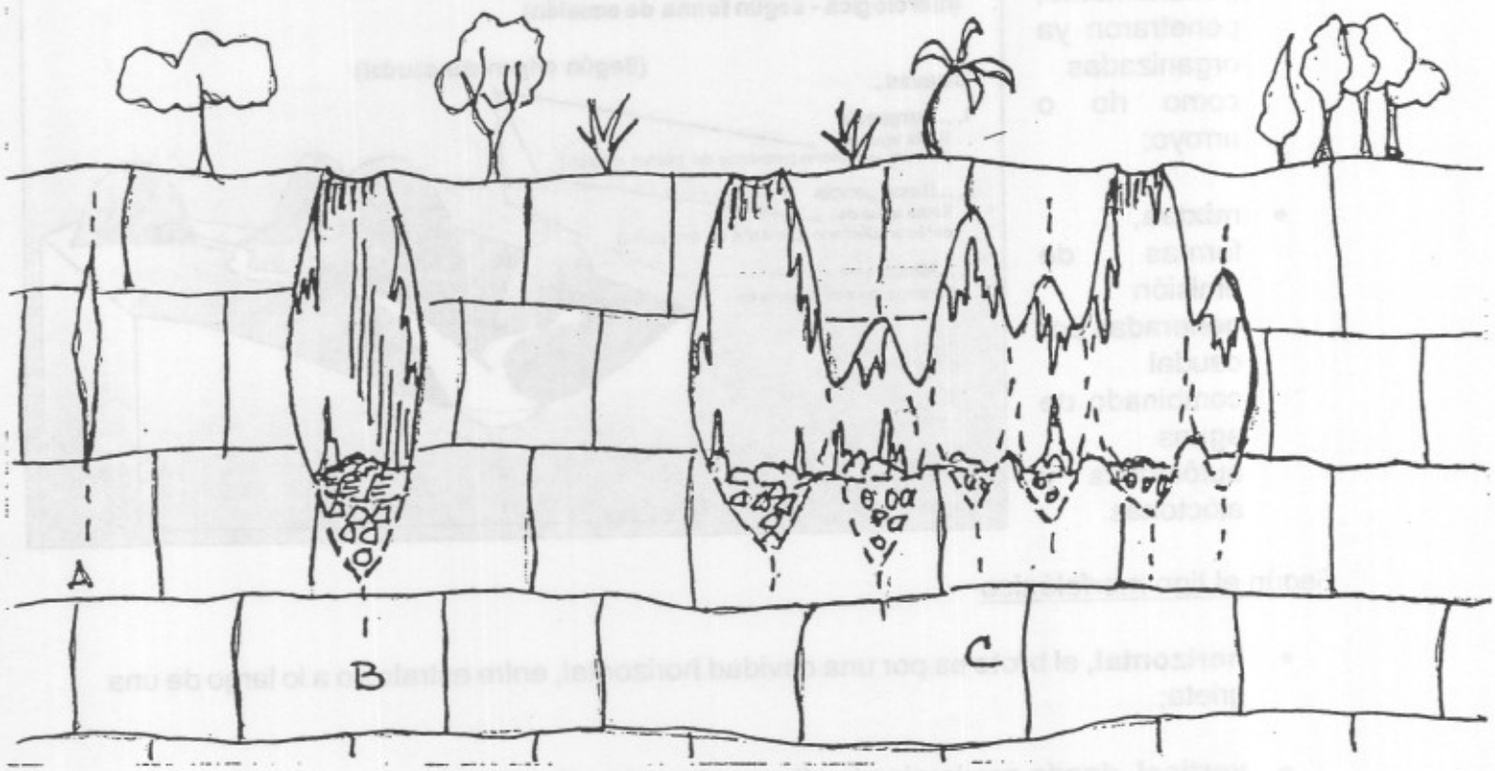
En la figura anterior se muestra un dibujo de cuevas de "erosión inversa"

**Para otra ilustración de cuevas de erosion inversa (ver página 47)**

## Formas de Emisión

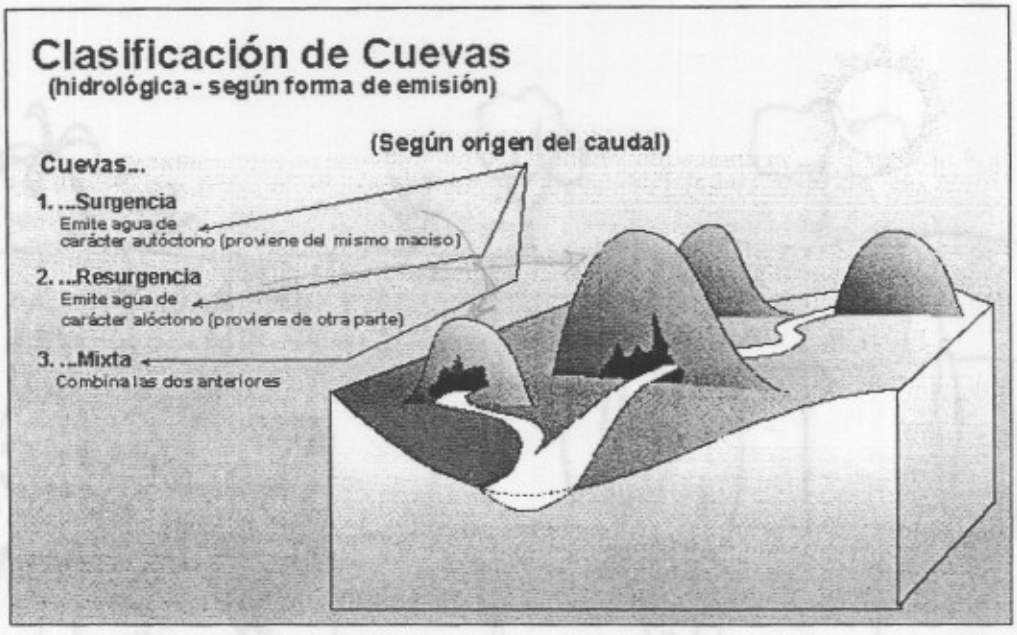
Según el origen del caudal (surgencias)

- **exsurgencias,** manantiales que emiten aguas autóctonas de un macizo kárstico producidas por las precipitaciones;




Cuevas de "erosión inversa": A, cavidad embrionaria fusiforme en profundidad; B, cueva de "erosión inversa" simple, formada por un "huso" y C, cueva de "erosión inversa" compuesta.

- **resurgencias,** resolladeros de aguas predominantemente alóctonas, que han atravesado el macizo al cual, generalmente, penetraron ya organizadas como río o arroyo;



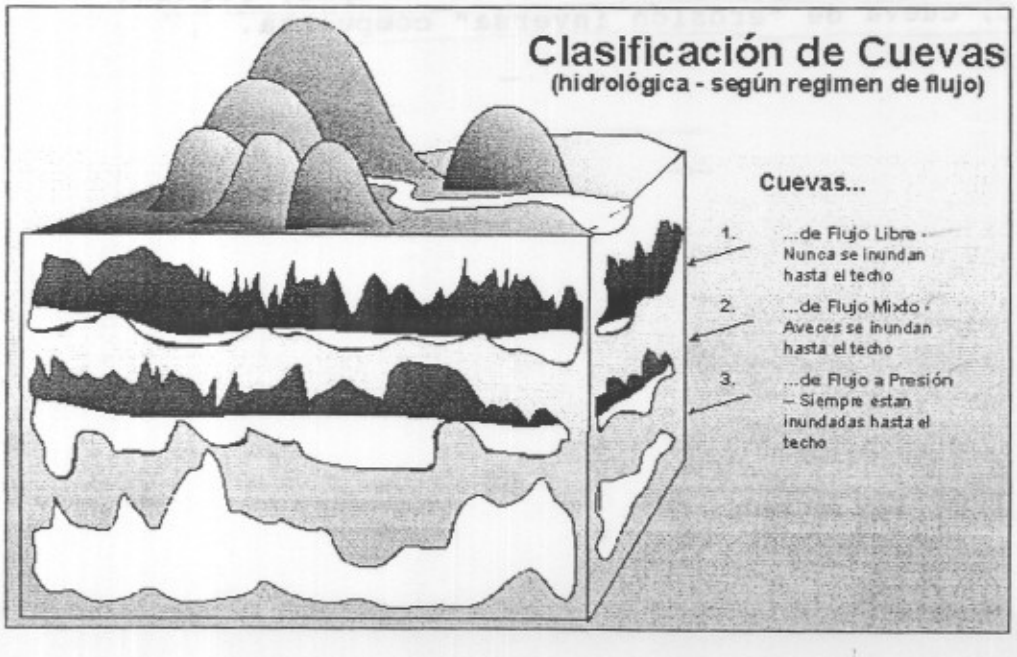

- **mixtas,** formas de emisión generadas por caudal combinado de aguas autóctonas y alóctonas.

Según el tipo morfológico

- **horizontal,** el brote es por una cavidad horizontal, entre estratos o a lo largo de una grieta;
- **vertical,** donde predomine la altura sobre el ancho del conducto.

**Según el número de cavidades emisivas**

- **sencilla,** el agua brota por una sola cavidad;




- **múltiple,** fluye por varias cavidades grandes o pequeñas.

**Según el régimen de flujo**

- **libres,** cavidades donde la corriente tiene un

espacio entre la bóveda y la superficie del agua y corre gravitacionalmente;

- **a presión,** donde el agua ocupa la cavidad y circula en conducción forzada;
- **mixtas,** donde el régimen de flujo, estacional u ocasionalmente, presenta una u otra de las características anteriores.

## ESPELEOTEMAS

La raíz de palabra espeleotema viene del griego "spelaion" que significa cueva y "thema" que significa depósito. Los espeleotemas también son conocidos como **depósitos litoquímicos y espeleolitos** y como "formaciones secundarias". Los espeleotemas han llamado la atención a los que exploran y estudian las cuevas por sus formas muy particulares. Hay una infinidad de formas en los espeleotemas, algunas de una belleza increíble, la cual queda revelada ante nuestros ojos en medio de la oscuridad absoluta de estas cavidades subterráneas por la luz artificial del espeleólogo. Los espeleotemas han generado gran cantidad de interés no tan solo por su belleza, sino también por la multiplicidad de formas que pueden tomar y las posibles explicaciones para ello.

### ¿Cómo se forman?

Antes del agua infiltrarse en la roca caliza se acidifica con dióxido de carbono – $CO_2$ – de la atmósfera y de la materia orgánica en descomposición en el suelo. De esta forma se inicia la disolución de la roca caliza, pudiendo llegar a saturarse de carbonato de calcio – $CaCO_3$ – el agua en su recorrido por la los conductos a través de la roca caliza. Cuando el agua saturada, que viene descendiendo a través de la roca llega a la cueva y entra en contacto con la atmósfera que por lo general tiene un contenido de $CO_2$ más bajo, libera parte del gas, produciéndose la precipitación del $CaCO_3$. Otro mecanismo es la evaporación del agua, especialmente en climas áridos y fríos donde pueden jugar un papel destacado. Este precipitado da origen a una de las múltiples espeleotemas que se encuentran en las cuevas.

### Compuestos más frecuentes en los espeleotemas

El compuesto más frecuente es el carbonato de calcio, que aparece en gran variedad de estructuras y morfologías y la cual se precipita en dos formas: calcita y aragonita. La calcita es la más común y la que vemos mayormente en las cuevas en Puerto Rico. La aragonita se asocia a temperaturas elevadas, menor grado de humedad y presencia de iones de magnesio en el agua. La aragonita a veces cristaliza en forma de agujas o de una forma masiva.

Estos minerales son incoloros y sus distintos colores se deben a:

1. Presencia de materia orgánica en los precipitados:
   - Filtraciones
   - Ácidos húmicos y fúvicos (descomposición del suelo)
   - Guano o compuestos procedentes de restos vegetales

2. Presencia de iones metálicos

3. Defectos de la red cristalina de los minerales

4. Bacterias las cuales producen sales metálicas que causan color

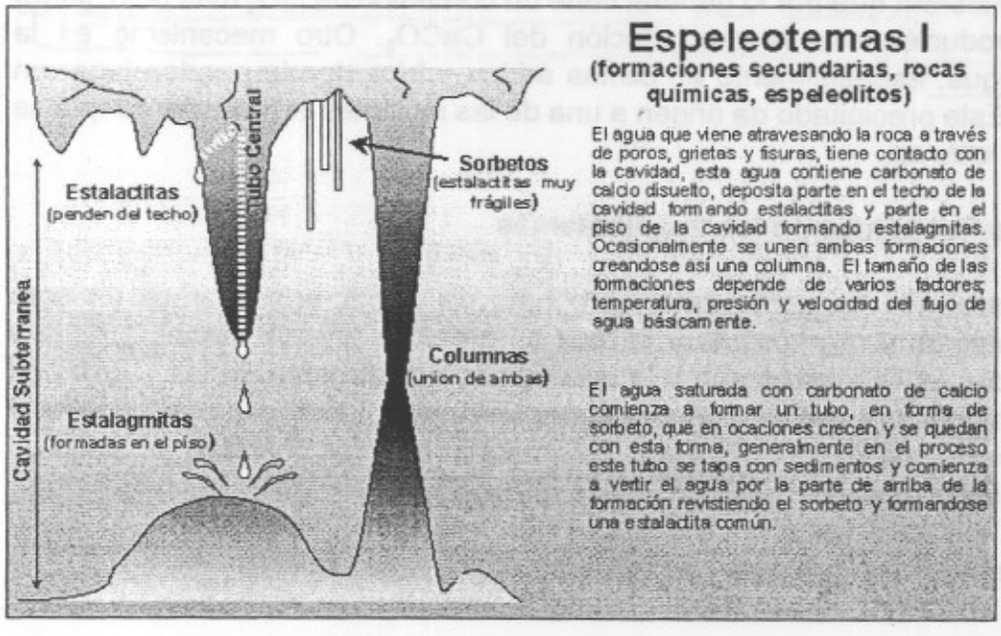
5. Por compuestos de magnesio

Después de la calcita y la aragonita, el yeso es el mineral más abundante en el medio subterráneo.

**Morfología de los espeleotemas**

Hill y Forti (1986) consideran cinco mecanismos básicos para la formación de los precipitados, en función del tipo de aporte de agua: goteo, filtración, flujo, condensación y crecimiento bajo una lámina de agua.

Según los lugares donde se encuentren, los espeleotemas se denominan **cenitales,** cuando se encuentran en el techo de la cavidad; **parietales**, cuando se localizan en las paredes y **pavimentarios,** cuando pertenecen al piso.




Entre los espeleotemas cenitales se encuentran las **estalactitas,** que se forman cuando la solución, infiltrándose a través de grietas, alcanza la atmósfera de la cueva y disminuir la presión a la que se encuentra sometida por lo que el dióxido de carbono se libera y se precipita la calcita; con el

tiempo se forma un tubito (denominado "sorbeto" en Puerto Rico) con desarrollo ortogeotropo (hacia tierra). Este espeleotema, hueco en su eje, continúa su crecimiento hasta que por alguna circunstancia se le tupe el conducto central, por lo que el agua corre entonces por su superficie y comienza a engrosar la estalactita cuyo crecimiento cesa cuando deja de recibir el flujo de agua.

Otros espeleotemas cenitales son las **anemolitas,** es un tipo de estalactita inclinada (a veces también son pavimentarias). La inclinación indica la dirección de la cual sopla el viento (o soplaba en el momento en que se formó) porque la incidencia de la corriente de aire disminuye la presión parcial del dióxido de carbono y facilita la deposición de la calcita, mientras que al otro lado, aumenta comparativamente la presión parcial del dióxido de carbono y se reduce la deposición. Sin son espeleotemas activos, indica la continuación de la cavidad, si son inactivos son evidencia de las paleocorrientes de aire de climas anteriores al actual.

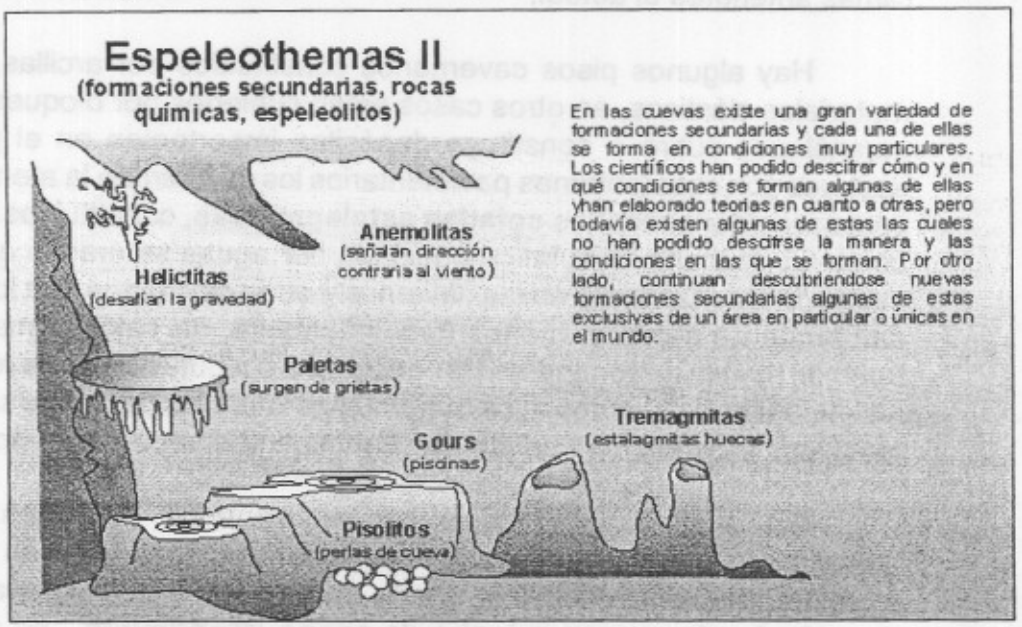
Hay algunos pisos cavernarios constituidos por arcillas, arenas, gravas y otros materiales clásticos, en otros casos están cubiertos por bloques y, a veces, el guano de murciélagos cubre o constituye depósitos importantes en el pavimento. En algunos sectores son espeleotemas pavimentarios los que llaman la atención del espeleólogo y, a veces, son denominados **coladas estalagmíticas**, constituidos por **sínter**, que se define como un depósito litoquímico originado por aguas saturadas que dan lugar a costras y capas de rellenamiento en las cavernas y otras cavidades, por lo general constituidos por carbonato de calcio y, menos frecuentemente, de calcio y magnesio; estos depósitos también suelen denominarse **travertina**, pero algunos autores reservan este término para los depósitos vinculados a los manantiales kársticos de aguas saturadas y, a veces, a los cambios de pendientes de los ríos transfluentes tales como rápidos y cascadas.

En algunos lugares se encuentran unos depósitos, a veces blandos, de consistencia pastosa y hasta casi líquidos que, cuando están secos, pueden tomar un aspecto granular o cristalino, puede tratarse de una sustancia denominadas **leche de luna, leche de gnomo o leche de enano (Mondmilch,** en alemán y **moon milk,** en inglés), conocida desde hace siglos y a la cual se le atribuían una serie de propiedades misteriosas, entre otras, curativas. Al parecer esta sustancia se forma por la acción de micro-organismos litófagos, tal vez actinomicetos y pudiera tener propiedades antibióticas, lo que explicaría las características que se le atribuyen.

Las **helictitas** ("helicotitas" o "excéntricas") son espeleotemas que parecen desafiar la ley de la gravedad pues se pueden formar en cualquier parte de la cavidad, bóveda, paredes o piso y hasta sobre bloques sueltos u otros espeleotemas y crecen en cualquier dirección. Hay distintos criterios sobre su origen, unos investigadores las atribuyen a la capilaridad, otros a las fuerzas de cristalización, algunos consideran necesario para su génesis una absoluta estabilidad de la atmósfera de la cueva, pero otros, por el contrario, señalan como imprescindible la existencia de micro-corrientes de aire; por todo lo anterior, no existe una explicación única y definitiva sobre estos espeleotemas.

En el piso y con desarrollo plagiotropo (crecimiento hacia arriba), se encuentran las **estalagmitas** que se forman al caer las gotas de la solución, producirse la salpicadura, disminuir la presión parcial del dióxido de carbono y precipitarse la calcita. Aunque es frecuente encontrar estalactitas en el techo y no existir estalagmitas debajo o a la inversa, algunas veces el crecimiento de ambos espeleotemas conduce a la formación de una **columna**, aunque pueden encontrarse columnas formadas solamente por el crecimiento de una estalactita o de una estalagmita.

También tenemos entre los espeleotemas pavimentarios, las **tremagmitas** o "estalagmitas huecas" de distinto tipo y origen, entre las cuales tenemos las "tremaestalagmitas" (estalagmita ahuecada posteriormente a su formación por un goteo ácido), las "anagmitas" (estalagmitas huecas formadas por brotes de aguas subterráneas procedentes de niveles inferiores), las "geisermitas" (también alegadamente formadas de abajo a arriba, pero por aguas termales como los géiseres), las "micelagmitas" (tremagmitas formadas en el fango por la salpicadura del goteo y que son muy frágiles), etc.




En lugares donde corren las aguas en forma laminar, en capa, cuando se producen cambios en la pendiente, precisamente en ese punto, área o zona, se precipita el carbonato de calcio como resultado de la pérdida de presión parcial del dióxido de carbono al cambiar el carácter del flujo; progresivamente se va produciendo una especie de represa o "piscina", internacionalmente conocidas con el término **gour**. En el fondo de los gours suelen formarse **pisolitos** o "perlas de cueva", concreciones redondeadas u ovoides que, a veces también se forman en "nidos" individuales y hasta en sectores del piso, donde el flujo laminar mantiene partículas en agitación a cuyo alrededor se depositan capas concéntricas de calcita, de modo muy semejante a como se forman las perlas en las ostras.

En algunas paredes cavernarias se encuentran espeleotemas aplanadas en forma de escudo o de paleta de pintor, de donde se deriva su nombre de **paletas**, que se forman a partir de una grieta y están constituidas por dos discos o tapas unidos, en cuyo interior

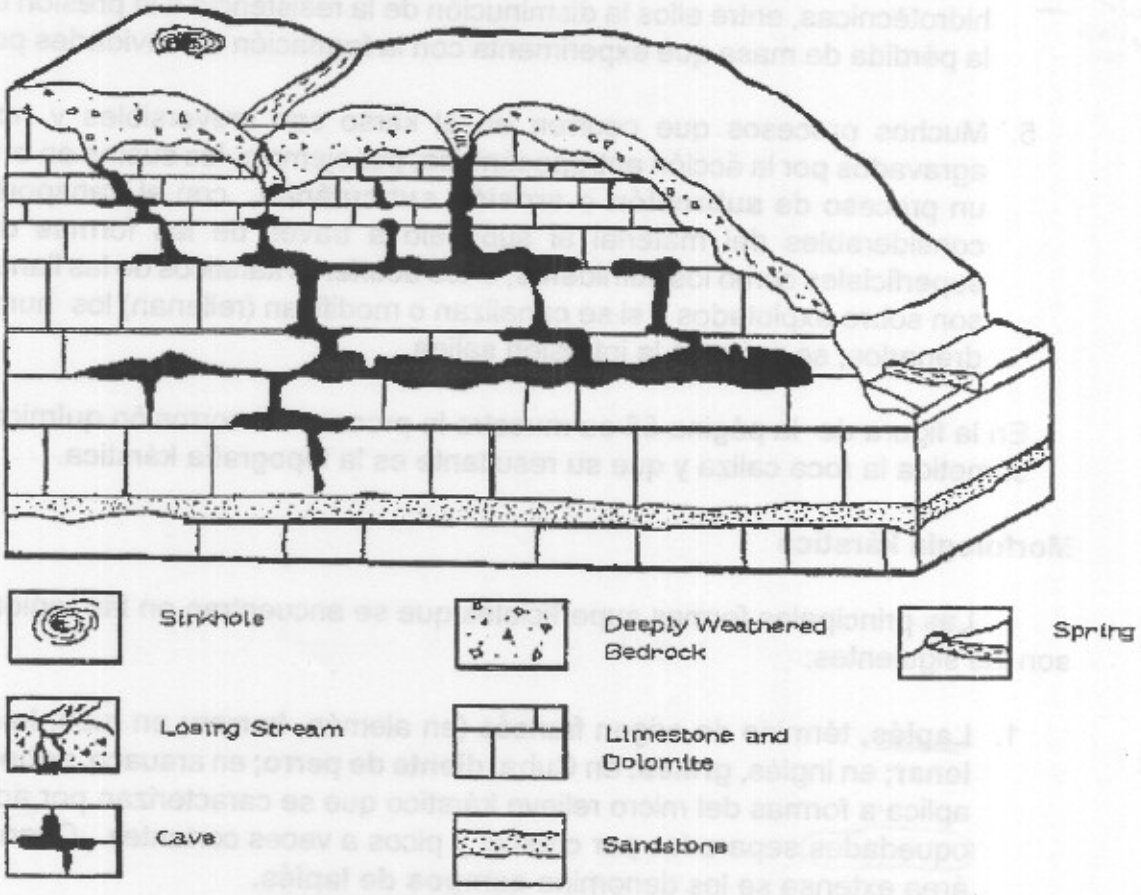
hueco, cuando están activas (en crecimiento), contienen agua a presión, que al surgir de la grieta es precisamente el origen de la solución que genera el espeleotema. Es posible, incluso, que se formen a partir de una estalactita o columna agrietada.

18-Oct-02

## El Karso

Recordemos que el karso es un complejo territorial natural, paisaje o ecosistema y no sólo las rocas carbonatadas o las formas del relieve a ellas asociadas, sino que incluye la hidrología o drenaje superficial y subterráneo, los suelos, la vegetación y todos los componentes del medio ambiente o entorno geográfico.

CUTAWAY VIEW OF TYPICAL KARST TOPOGRAPHY




Entre las principales características del karso, que debemos conocer para poder estudiarlo y protegerlo, se encuentran las siguientes:

1. La mayor parte del drenaje o avenamiento es subterráneo y la infiltración de las lluvias puede alcanzar alrededor del 40%. Cuando alguna corriente importante logra atravesar el karso, por lo general tiene sus fuentes en áreas impermeables, es **alóctona** y, además recibe importantes aportes del drenaje subterráneo.

2. En el karso la red de conductos y cavidades hidrogeológicas pueden intercomunicarse y esto es muy frecuente pero, a veces, dos pozos situados a muy corta distancia alcanzan el nivel de saturación a profundidades muy distintas porque han alcanzado áreas o líneas de drenaje preferencial diferentes.

3. Los acuíferos kársticos son importantes fuentes de abastecimiento doméstico, industrial, agrícola y para otros usos en muchos países. En Puerto Rico son los más importantes y caudalosos.

4. Los territorios kársticos presentan severos obstáculos a las construcciones civiles e hidrotécnicas, entre ellos la disminución de la resistencia a la presión de carga por la pérdida de masa que experimenta con la formación de cavidades por corrosión.

5. Muchos procesos que ocurren en el karso son irreversibles y no deben ser agravados por la acción antropocéntrica; por ejemplo, los suelos en el karso sufren un proceso de **subrosión o erosión subcutánea,** con el transporte de masas considerables del material al subsuelo a través de las formas de absorción superficiales como los sumideros; si los acuíferos kársticos de las llanuras costeras son sobre explotados o si se canalizan o modifican (rellenan) los humedales para drenarlos, se provoca la intrusión salina.

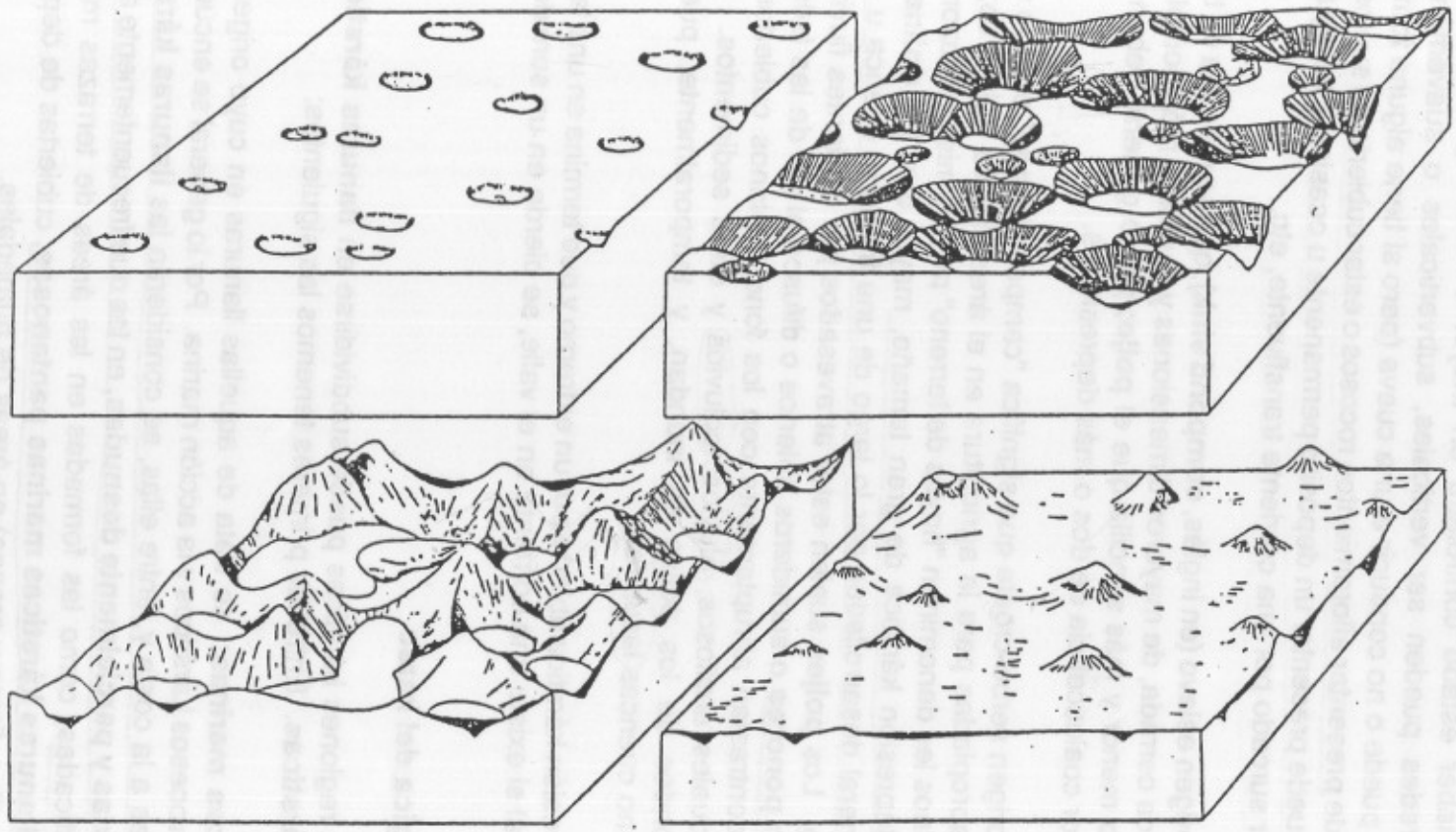
En la figura de la página 55 se muestra le proceso de corrosión química a la que es sometida la roca caliza y que su resultante es la topografía kárstica.

**Morfología kárstica**

Las principales formas superficiales que se encuentran en las regiones kársticas son las siguientes:

1. **Lapiés,** término de origen francés (en alemán, **karren;** en ruso, **karr;** en serbio, **lenar;** en inglés, **grikes;** en Cuba, **diente de perro;** en arauaco, **seboruco),** que se aplica a formas del micro relieve kárstico que se caracterizan por acanaladuras y oquedades separadas por crestas y picos a veces cortantes. Cuando cubren un área extensa se les denomina **campos de lapiés.**

2. **Dolinas,** término de origen eslavo (en español reciben distintos nombres locales: en España **torca y avenc;** en Puerto Rico, **sumidero;** en Cuba, **hoyo;** en Venezuela, **haitón;** en Yucatán, **cenote;** en las montañas kársticas de México,



(*upper left*) 'Young' karst with extensive flat surfaces between dolines, much of the original surface remaining.
(*upper right*) 'Adolescent' karst, with larger dolines and many coalescing.
(*lower left*) 'Mature' karst (*Cockpitlandschaft*): the original surface has disappeared; large dolines and uvalas lie between the *Cockpithügeln*.
(*lower right*) 'Old' karst. Only isolated hills remain upon the residual plain.

Karst cycle

3. **sótano, etc.)**, utilizado para designar una depresión simple en forma de embudo, caldero o platillo; se trata de la depresión kárstica cerrada elemental donde la disolución **puede** haber estado controlada en mayor o menor grado por la estructura; sus paredes pueden ser verticales, subverticales o suavemente inclinadas; el fondo puede o no conducir a una cueva (pero sí tiene alguna forma de absorción) y puede presentar afloramientos rocosos o estar cubierto de suelos u otros sedimentos; puede presentar un depósito permanente u ocasional de aguas superficiales o estar surcado por una corriente transfluente, etc.

4. **Uvala**, término de origen eslavo (en inglés, **compond sink)**, que se refiere a un tipo de depresión kárstica cerrada, de mayores dimensiones y contorno más complejo que la **dolina**, pero menor y más sencilla que el **polje;** por lo general deben su origen a la unión por coalescencia de dos o más depresiones.

5. **Polje,** término de origen serbo-croata que significa "campo cultivado" porque son las únicas zonas apropiadas para la agricultura en el área clásica del karso; en Cuba, los campesinos les denominan "hoyos de terreno" por las mismas razones; se trata de una depresión kárstica de gran tamaño, mayor que las **dolinas** y **uvalas**, por lo general desarrolladas por lo largo de una fractura, cuenca u otro contacto tectónico. Los **poljes** suelen estar atravesados por corrientes fluviales que se pierden en **ponores** o sumideros abiertos o difusos al pie de las laderas empinadas, que contrastan abruptamente con los fondos planos cubiertos de suelos rojos residuales arcillosos, aluvios, coluvios y otros sedimentos. Con frecuencia los fondos de los poljes se inundan, y temporalmente, pueden transformarse como cuencas lacustres.

6. **Valle ciego**, depresión kárstica abierta por un extremo y que termina en una ladera abrupta, en la cual si existe una corriente en el valle, se pierde en un sumidero o **ponor.**

**Clasificación morfológica del karso**

El relieve de las regiones kársticas puede subdividirse en **llanuras kársticas y alturas y montañas kársticas.** Entre las primeras tenemos las siguientes:

1. **llanuras kársticas marinas:** se trata de aquellas llanuras en cuyo origen han contribuido los procesos kársticos y la acción marina. Por lo general se encuentran en fajas paralelas a la costa y, entre ellas, se consideran las **llanuras kársticas marinas desnudas y parcialmente desnudas,** en las que frecuentemente afloran las rocas karstificadas, como las formadas en las áreas de terrazas marinas abrasivas y las **llanuras kársticas marinas pantanosas,** cubiertas de depósitos superficiales (arcillas, limos y arenas) en áreas de humedales.

2. **llanuras kársticas fluviales:** desarrolladas a lo largo de los cursos de los ríos

principales, a veces parcialmente desnudas, pero más frecuentemente cubiertas por sedimentos aluviales profundos.

Entre ambos tipos se encuentran aquellas llanuras con características mixtas, cubiertas por depósitos superficiales y suelos más o menos profundos, en cuyo origen contribuyó no sólo la acción marina y la fluvial, sino también procesos denudacionales y que presentan elevaciones kársticas residuales como los mogotes aislados, cadenas de mogotes y macizos karstificados.

En el karso de alturas y montañas pueden destacarse:

1. **karso de mesetas:** elevaciones de superficie aplanada y bordes abruptos que, frecuentemente, corresponden a antiguas llanuras elevadas por la neotectónica y, posteriormente, disecadas por la acción fluvial.

2. **karso de mogotes**, cerros kársticos más o menos aislados, de paredes abruptas y cimas cónicas o redondeadas. De acuerdo a su morfología han sido denominados **karso cónico**, **karso de torres, karso cupular,** etc.. Pueden ser simétricos o asimétricos, sus dimensiones, factores genéticos y otras particularidades pueden variar.

3. **macizos montañosos kársticos,** áreas amplias cuyas características dependen de la extensión y potencia (espesor) de las rocas carbonatadas, la altitud sobre el nivel del mar y sus condiciones climáticas. Por lo general están cortados por profundos valles fluviokársticos o cañones y presentan cuevas de desarrollo vertical o fuertemente inclinadas.

**La Espeleología como disciplina de estudio**

Como señalamos en el resumen de la historia de la espeleología en Puerto Rico, esta disciplina, salvo honrosas excepciones, como estudio sistemático de las cuevas no tiene antecedentes. Entre nosotros, la actividad espeleológica cuando no ha sido objeto de la curiosidad o de depredadores, ha sido casi siempre una actividad de recreación. Pocas veces la actividad espeleológica ha sido orientada específicamente al estudio del mundo subterráneo como fenómeno geológico, geomorfológico, biológico, paleontológico, mineralógico, geográfico, etc.

Esta parte del curso pretende cubrir en forma breve algunas de las contribuciones que podemos hacer en el estudio de las cuevas en Puerto Rico y de esta forma abrir el sendero a otras investigaciones y contribuir a la protección de este mundo fascinante. No será posible cubrir las posibilidades de estudios que se pueden hacer y nos concentraremos en aquellas con posibilidades inmediatas.

## Documentación

Luego de adquirir las destrezas y conocimiento en las técnicas espeleológicas que le permitan hacer una exploración con seguridad, lo primero que necesita cuando usted sale al campo es una libreta con papel (preferible del tipo impermeable) y lápiz para poder hacer sus anotaciones de campo. No puede confiar todo a su mente ya que serán muchos los detalles con los que se encontrará. El propósito del viaje debe de ser discutido con el grupo (nunca debe de explorar cuevas solo) que va a realizar el viaje de campo, para determinar no tan solo el equipamiento personal necesario, sino las demás herramientas de trabajo necesarias para lograr los objetivos planificados. Ya verificado que todo el equipo esta disponible se parte al lugar.

Es imprescindible que la organización tenga un catastro de cuevas, el cual será el depositario de toda la información que se recoja. Una vez se regrese del viaje de campo se hará una copia de las notas del viaje de los distintos miembros y se procederá a entrar al catastro.

Figura 8

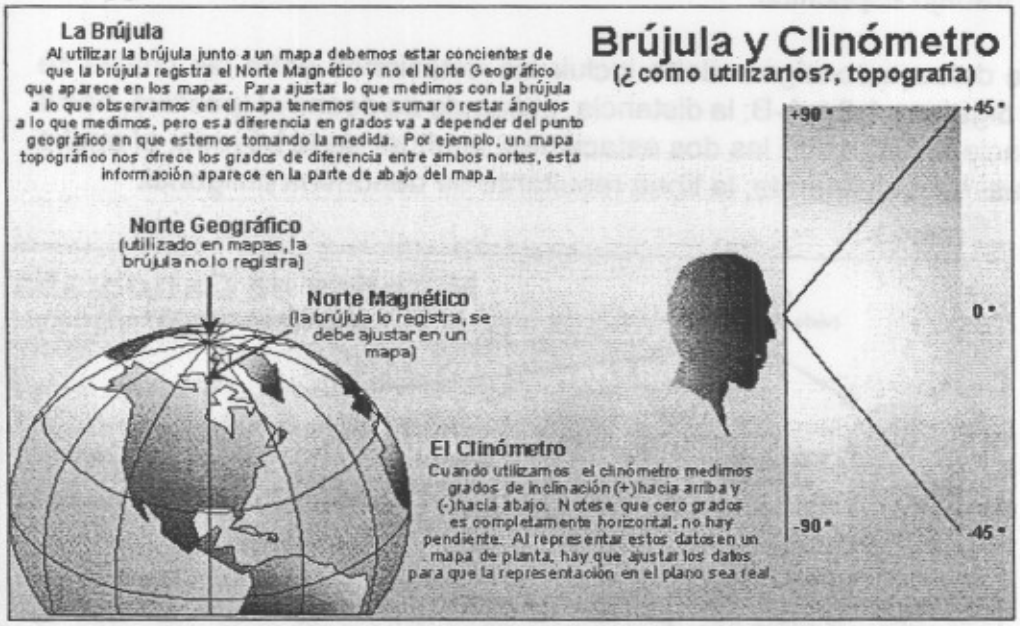
## Topografía y Cartografía

Uno de los aspectos más importantes de los estudios básicos de espeleología es la confección de los mapas de una cueva. La topografía espeleológica no es más que una simplificación de la topografía exterior. Decimos simplificación de la topografía exterior ya que se ha llegado a una complejidad de los medios y técnicas que no son accesibles a las condiciones naturales de las cavidades y menos a los presupuestos espeleológicos de los grupos. La topografía de una cavidad nos señala aparte de la profundidad y longitud, otra información como la forma, la litología, etc., una serie de datos que ayudarán y servirán de base para otros estudios, tales como biológicos, geológicos, hidrológicos y muchos otros.

Los instrumentos utilizados en la topografía espeleológica son la **brújula, cinta de medir** y el **clinómetro.**

La brújula es un instrumento que nos permite medir ángulos horizontales y consiste en una aguja imantada que se orienta hacia el **norte magnético** y que está montada

sobre un **limbo** graduado, por lo general en 360E(pero no siempre); el ángulo medido a partir del cero, que evidentemente, coincide con los 360E, se denomina **rumbo** o **acimut magnético.** Algunos modelos de brújulas tienen un dispositivo (generalmente un tornillito) que, conocidos el ángulo y la fecha de la declinación magnética de la región donde se esté trabajando, permiten ajustar el limbo de modo que pueda leerse directamente de la brújula el **rumbo** o **acimut geográfico;** esta información, necesaria para ajustar la brújula, suele aparecer en los mapas topográficos o puede solicitarse a la agencia o institución que tiene a su cargo tales funciones.




La cinta de medir (plástico, metal u otro) la cual tiene impreso las medidas de longitud en pies o metros. La norma internacional en la confección de mapas es el sistema métrico. Es necesario tener en cuenta que, a veces, la distancia medida o distancia real no es la distancia horizontal, que es la que debemos consignar en el mapa.

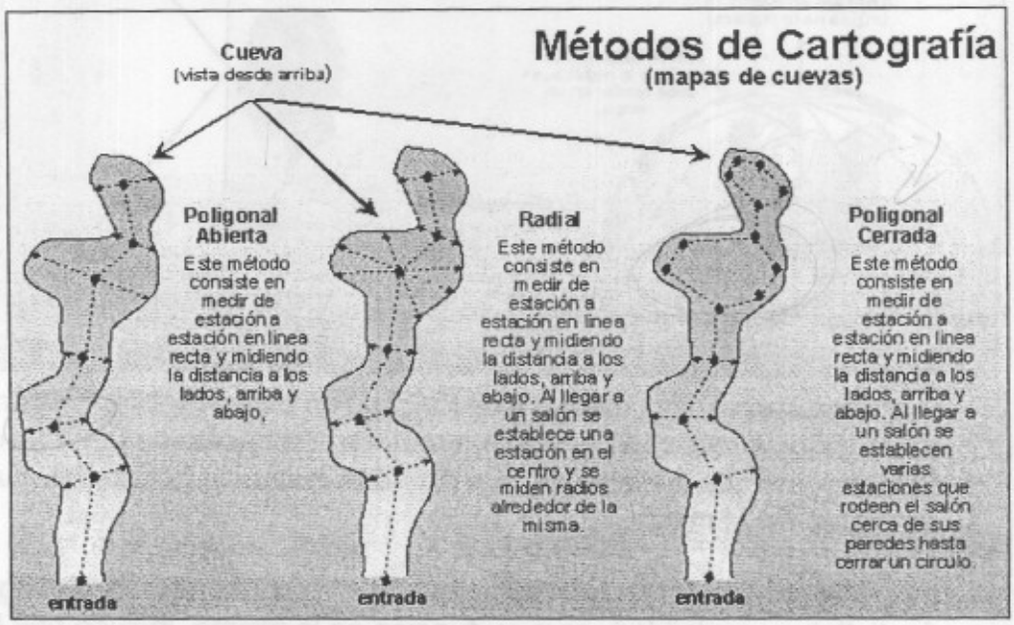
El clinómetro es un instrumento que se utiliza para medir ángulos verticales; los hay de distinta complejidad, pero su función es la misma, incluso hay brújulas que tienen un clinómetro incorporado. La medida de los ángulos verticales permite topografiar las pendientes y la altura de las bóvedas, por lo que es útil para poder consignar en el mapa la distancia horizontal y confeccionar las secciones transversales y los perfiles longitudinales. Esta información se puede obtener mediante la aplicación de la trigonometría (la distancia horizontal es igual a la distancia real multiplicada por el coseno del ángulo de la pendiente medido con el clinómetro) o de un modo gráfico (trazando a escala la distancia real, el ángulo medido y la proyección es la distancia horizontal en el triángulo rectángulo determinado).

En la figura 8 se muestra los distintos instrumentos y otros equipos necesarios para la topografía de una cueva.

Para topografiar una cueva se necesita un grupo de espeleólogos bien compenetrados y dotados de gran paciencia y amor por la espeleología porque la topografía es un proceso lento, cuidadoso y, a veces, engorroso y agotador. Este grupo

puede estar compuesto de tres o cuatro compañeros o, incluso, de sólo dos pero, en este último caso, es mucho más trabajoso. Debemos recordar que se requiere medir los ángulos verticales y horizontales, medir las distancias, escribir los datos e ir dibujando el mapa y, a veces, cuando se requiere una fuente de iluminación poderosa, el transportar y utilizarla es todo un trabajo específico.

El registro de datos a consignar debe incluir las estaciones entre las cuales se toman las medidas, digamos 1-2 o A-B; la distancia, el ángulo de desnivel (positivo, hacia arriba o negativo, hacia abajo) entre las dos estaciones; la altura de la bóveda, el ancho cuando competa y así sucesivamente; la línea resultante se denomina poligonal.



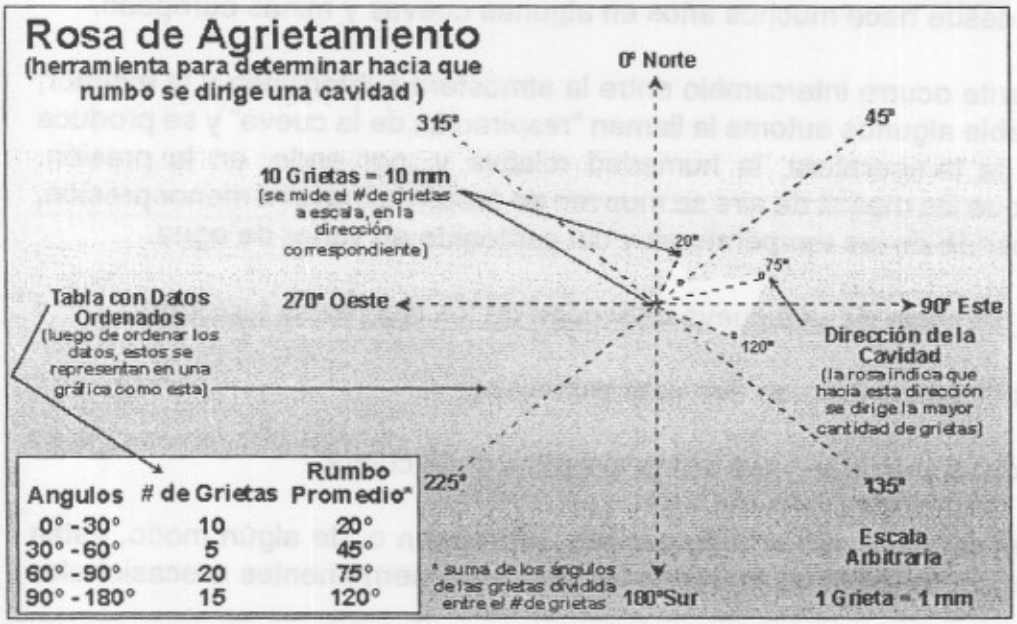

Hay varios métodos para realizar la topografía de una cueva y, por lo general, se emplea en la práctica una combinación de varios de ellos. El método de **poligonal abierta** consiste en trazar una línea boca-fondo o (boca-punto alcanzado) con los anchos, altos y demás datos necesarios; el de **poligonal cerrada** es cuando la sucesión de estaciones empieza en la boca o entrada de la cueva o salón que se esté cartografiando, discurre a lo largo de una pared, regresa por la pared opuesta y termina en la estación inicial, y por último, mencionaremos el **método radial** para el cual se selecciona un lugar estratégico, que puede ser el centro del salón y, a partir del mismo, se toman lecturas y distancias en distintas direcciones, como si fueran radios a partir de un centro.

En la figura anterior se muestran ejemplos de los distintos métodos de realizar la topografía.

En el mapa final que constituirá la cartografía, debemos consignar el nombre de la cavidad, su localización general, los nombres de los topógrafos, la fecha en que se hizo el levantamiento y los instrumentos utilizados. Es conveniente incluir los símbolos empleados en la presentación final.

## Rosa de agrietamiento

Como en muchas partes las grietas constituyen las vías preferenciales para la circulación de las aguas subterráneas, es evidente que, si conocemos su orientación, también conoceremos la posible orientación de los conductos subterráneos y, por tanto, podremos dirigir nuestros esfuerzos en la búsqueda de nuevas cavidades durante la exploración y tendremos elementos de juicio adicionales al proponernos estudiar su génesis y evolución.




En parte esta labor podemos realizarla estudiando el mapa de la cueva donde se reflejan las orientaciones preferenciales de las galerías y salones; no obstante, existen además métodos gráfico-matemáticos que nos pueden ayudar en tal labor e informarnos hacia donde se orientan los sistemas más importantes del agrietamiento. Entre estos métodos se encuentra la representación en **gráficos de barras** y la **rosa de agrietamiento**.

En la figura anterior se muestra el gráfico para determinar el rumbo usando el método de Rosa de agrietamiento, un grafico cartesiano y el procedimiento para construir una Rosa de agrietamiento.

## ESPELEOCLIMATOLOGIA

La **meteorología** estudia el **tiempo,** es decir las propiedades físicas de la troposfera en un momento dado en cualquier parte de la Tierra, tales como temperatura, presión, humedad, precipitación, insolación, cobertura de nubes, dirección y velocidad del viento, etc.

La **climatología** estudia las características promedio, durante un largo período del patrón general de las condiciones del tiempo, su variación estacional y las alteraciones extremas (huracanes, sequías y lluvias prologadas). Se refiere a datos estadísticos.

Por lo general las cuevas presentan condiciones de estabilidad relativa si las comparamos con las superficiales y sus oscilaciones periódicas o estaciónales son menores que las de la superficie.

Por estas razones el ambiente cavernario tiene influencia positiva en algunas enfermedades respiratorias como el asma, favorece la curación de la artritis y de otros trastornos. La **Espeleoterapia** es una nueva rama de la Medicina y de la Espeleología, aunque se practica desde hace muchos años en algunas cuevas y minas europeas.

Constantemente ocurre intercambio entre la atmósfera subterránea y la exterior; cuando es muy notable algunos autores la llaman "respiración de la cueva" y se produce por diferencias en la temperatura, la humedad relativa y, por ende, en la presión. Debemos recordar que las masas de aire se mueven de áreas de mayor a menor presión, la que a su vez depende de las temperaturas y del contenido en vapor de agua.

Las características del clima de una cueva dependen de los siguientes factores:

1. el clima superficial del área en que esté enclavada;
2. el número, forma y dimensiones de las entradas de la cueva;
3. las corrientes de agua que entran, circulan, atraviesan o, de algún modo, están relacionados con la cavidad, incluidos los depósitos permanentes u ocasionales (lagos),
4. su morfología y dimensiones (longitud, profundidad, etc.);
5. espesor de la roca que la cubre, su porosidad y permeabilidad, así como la fisuración del macizo;
6. los animales que viven en la cueva (biocenosis del ecosistema) que, a veces, con su presencia, como las colonias de murciélagos, constituidas por millares de individuos y sus deyecciones que pueden llegar a obstaculizar la circulación atmosférica, pueden modificar el ambiente cavernario, elevando la temperatura y aumentando la humedad considerablemente, dando origen a las cámaras o salones denominados "de calor" o "calientes" y a la estrechez que los aísla "trampas térmicas".

Las cuevas o sectores de sistemas cavernarios donde se producen cambios en las características de la atmósfera subterránea y donde existe una circulación activa del viento son denominadas "cuevas dinámicas" y, aquellas donde la estabilidad es notable, se conocen como "cuevas estáticas".

Las "cuevas humeantes" (o "fumantes") son aquellas donde, al producirse un escape de la atmósfera subterránea caliente y cargada de humedad y ponerse en contacto con el aire exterior más frío, el vapor de agua se condensa y brota como un chorro de humo blanco. Este fenómeno suele advertirse al amanecer, al anochecer y después de haber llovido y la localización de las columnas de vapor de agua o de las nubecillas son un indicio seguro de la localización de entradas de cuevas.

**Principales variables a estudiar para conocer el clima subterráneo**

Las variables principales que caracterizan el clima de las cuevas son la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica y la velocidad del viento; ellas cambian de sector en sector y hasta de salón en salón pero sus variaciones son, a veces, mucho más pequeñas que las superficiales; no obstante, los instrumentos utilizados para medirlas son los mismos por lo que deben emplearse equipos de alta precisión y buena calidad.

Para medir la temperatura del aire, del suelo y de las aguas, se utilizan **termómetros** de distinto tipo; para conocer la humedad relativa los **higrómetros** y los **psicrómetros** que, mediante dos termómetros, uno de registro húmedo y otro de registro seco, nos permiten conocer simultáneamente las temperaturas; la presión atmosférica se mide con los **barómetros** y la velocidad del viento con los **anemómetros.**

Existen equipos registradores de cuerda o de baterías, que funcionan ininterrumpidamente durante un período brindando un registro continuo y que pueden instalarse para obtener las características climatológicas durante ese lapso, son los **termógrafo, higrógrafos, barógrafos** y **anemógrafos**, instrumentos muy delicados, sensibles y, además costosos.

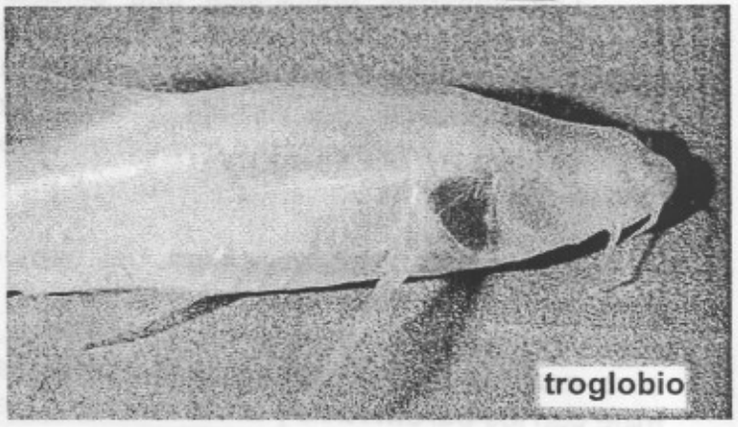
Para realizar el estudio, deben seleccionarse estaciones exteriores, en lugares significativos de la superficie y en lugares de la cavidad donde se registren las mismas variables, las cuales se señalarán en el mapa de la cueva. Al presentarse el informe final debe consignarse, además de las lecturas realizadas, las fechas y horas, las características de los equipos utilizados y el nombre de los investigadores.

Como dato interesante que demuestra la estabilidad climática en algunas cuevas y el papel aislante de las rocas carbonatadas, se sabe que, en cuevas profundas de las regiones montañosas de los Pirineos y de los Alpes, se han conservado acumulaciones de hielo, verdaderos glaciares subterráneos, depositados durante las épocas glaciales del Pleistoceno, decenas y hasta cientos de miles de años atrás.

## BIOESPELEOLOGIA

Unos de los aspectos más importantes de la exploración y estudio de las cavidades de **entrada,** la de **penumbra** y la de **oscuridad absoluta.** Los estudios bioespeleológicos incluyen los **taxonómicos** (descripción y clasificación) de los organismos cavernícolas o relacionados con las cuevas y la **ecología** o estudio de las relaciones entre los organismos y la totalidad de los factores físicos y biológicos que les afectan o que los influencian.

Algunos autores subdividen los estudios ecológicos en la **auto ecología** o ecología de individuos y poblaciones y la **sinecología** o ecología de sistemas completos y poblaciones ínter actuantes en un ambiente físico complejo y dinámico.


troglobio

La fauna subterránea propiamente cavernícola fue clasificada por Schiner (1854) en **troglobios**, habitantes exclusivos del mundo subterráneo; **troglófilos,** aquellos organismos que frecuentan las cuevas pero no viven exclusivamente en ellas y los "ocasionales" que, Racovitza (1907) llamó **troglóxenos;** en estos grupos en Puerto Rico se encuentran representados moluscos, insectos, quilópodos, diplópodos, arácnidos, crustáceos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, por sólo mencionar la macro fauna; los organismos acuáticos de la zona hidrogeológica de saturación permanente son denominados **freatobios.**

Entre las características de los **troglobios** se encuentra la **anoftalmia,** pérdida o reducción de los organismos de la visión; el **apterismo** en los insectos, que es la pérdida o reducción de alas; la **despigmentación,** o pérdida de la coloración por la falta de luz; el **alargamiento de las extremidades**, porque las usan como sensores en un mundo sin luz; la **gastrofagia,** o crecimiento desmesurado del abdomen por adaptación a un medio en que comer es un "evento fortuito" y, de este modo, tienen la posibilidad de adquirir reservas al encontrar o capturar alimento y, por último, **fosforescencia,** propiedad que adquieren algunos gusanos y hongos.

El estudio bioespeleológico debe tener en cuenta la protección y conservación de esos organismos únicos y, por ello, el espeleólogo debe ser extremadamente cuidadoso de no perturbarlos y las colectas deben estar reservadas a los especialistas.

## Otros campos de estudio

Se pueden hace muchos otros estudios tales como: de paleontología, química del agua de una cueva, establecer la cuenca hidrológica de una cueva o sistema de cuevas usando trazadores, presencia o ausencia de radón, paleo climatología, paleo sismología, etc.

## Bibliografía


1. Textos generales

   Geología, Geografía, Física, Geomorfología, Hidrología, Hidrogeología, Ciencias Ambientales, Ecología, etc.

2. Revistas y publicaciones periódicas

   Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, Caves and Karst del National Speleological Society Bulletin, NNS News y de otras organizaciones espeleológicas

3. U S Geological Survey Professional Papers, Water Supply Papers & Open-File Reports

4. Jennings, J. N., 1985, Karst Geomorphology, Basil Blackwell, Oxford.

5. Llopis Llado, N. 1970, Manual de Hidrogeología Cárstica, Edit. Blume, Barcelona.

6. Moore, George y Brother G. Nicholas, 1964. Speleology. The Study of Caves, D. C. Heath and Co., Boston.

7. Nuñez Jiménez, Antonio y otros, 1984. Cuevas y carsos, Edit. Militar, La Habana.

8. White, William B., 1988. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains, Oxford Univ. Press, New York.

9. Klimchouk, Alexander B. and others, 2000. Speleogenesis, evolution of karst aquifers, National Speleological Society, Alabama.

10. Cuenca Rodríguez, Jesús y otros, 1996. Manual de Iniciación a la Espeleología IMPRIMÉIS, Badalona, España.

11. Foucalt, A. Y otros, traducción Lago, M. Y otros, 1985. Diccionario de Geología

## GLOSARIO

**Abiótico** – lo no vivo, ej. agua, aire, tierra
**Acidulado** – ácido débil
**Acuífero** – aguas subterráneas que rellenan completamente los intersticios de un terreno poroso y permeable. Se forma por acumulación de aguas de infiltración por encima de un terreno impermeable que impide su descenso.
**Agresiva** – por lo general nos referimos a las aguas que contienen ácido y tienen capacidad para diluir la roca caliza.
**Biológicas** – su procedencia es de seres que tenían vida.
**Biótico** – lo que es característico de los seres vivos o que se refiere a ellos.
**Buza** – proviene de buzamiento que significa valor de inclinación de una capa o estrato, medido según la línea de máxima pendiente.
**Campo de estudio** – la aplicación del entendimiento para comprender una cosa
**Catalizador** – sustancia que altera la velocidad de una reacción química, pudiendo recuperarse sin cambios esenciales en su forma o composición al final de la reacción
**Cinética química** – parte de la química que trata de la medida e interpretación de las velocidades de reacción como base cuantitativa de la reactividad química
**Clásticas** – proviene de la palabra clasto, el cual es un fragmento de un cristal, un fosil o bien una roca incluido en una roca. El termino clásticas, se aplica a una roca constituida sobre todo por fragmentos de roca, minerales, fósiles. El término es frecuentemente empleado como sufijo, p.e., en bioclastos, piroclasto.
**Composición mineral** – de lo que está constituido un mineral
**Compresión** – reducción del volumen por efecto de la presión
**Corrosión** – destrucción gradual de un material por agentes químicos
**Diaclasas** – fractura que separa en dos partes una masa de roca, sin que se produzca desplazamiento a lo largo de ella
**Diagénesis** – proceso en virtud del cual un sedimento experimenta alteraciones, tanto en su estructura como en su constitución, tales que lo transforman en roca compacta
**Distensión** – desplazamiento producto de una falla normal, se usa también el concepto de falla normal
**Ecología** – estudio de las interrelaciones entre los seres vivos, y de ellos con su entorno
**Endémicos** – especie animal o vegetal que se considera originaria y exclusiva de la región donde habita
**Epidiagénesis** – epi, por encima, (ver diagénesis)
**Espeleogenes** – relativo a la formación de las cuevas o su origen
**Espeleotemas** – relativo a las formas que toman las formaciones en las cuevas
**Ética** – parte de la filosofía que trata de la moral y de las obligaciones del ser humano
**Evaporíticas** – depósito constituido por la precipitación química de sales disueltas en agua, como resultado de la concentración, por intensa evaporación generalmente en las marismas poco o nada comunicadas con el mar o en lagos salados

**Evapotranspiración** – fenómeno por el que parte del agua es devuelta a la atmósfera por evaporación directa y por transpiración directa de las plantas
**Extinción** – en biología cuando desaparece una especie del planeta
**Extirpación** – en biología cuando desaparece una especie de un lugar, región o isla, pero sobrevive en otro lugar
**Fallas** – fractura del terreno con desplazamiento relativo de las partes separadas y existen muchas clasificaciones o tipos de fallas
**Freático** – capa del subsuelo en que se encuentra las aguas subterráneas
**Granulometría** – estudio de la distribución de los elementos de una roca detrítica según su tamaño
**Holofósil** – holo significa entero, enteramente fósil
**Intemperismo** – expuesto a los elementos de la atmósfera
**Litoestratigráfico** – estratigrafía basada solamente en las diferencias de la naturaleza litológica entre las capas, independientemente de su contenido en fósiles
**Litología** - naturaleza de las rocas de una formación geológica
**Litoquímicas** – piedra, roca o mineral de origen químico
**Litosfera** – capa más externa entre las envolventes sólidas del globo terráqueo, pero susceptible de deformación en la escala geológica de tiempo. De un grosor medio de 100 km.
**Metamorfismo** – transformación de una roca en estado sólido debido a la elevación de temperatura y/o presión, con cristalización de nuevos minerales y adquisición de textura y estructuras particulares diferentes de las rocas originales
**Meteorización** – alteración de los materiales bajo la acción de los agentes atmosféricos, mucho periodo de tiempo
**Neoautóctono** – sedimentos que se depositan después de una fase de corrimiento, sobre el autóctono y sobre el alóctono a la vez, suministrando este último buena parte del material. Es una formación postmanto que cubre el contacto anormal del corrimiento
**Oolíticas** – caliza de cemento finamente espático, con fragmentos de cuarzo, trozos de concha y otros organismos variados, fragmentos de caliza o caparazones

Merofosil – parcialmente Fosil
Alóctono – del lugar donde se originó
Transfluente – que viene de otro lugar y pasa, no se queda

**Origen** - como se originaron o de donde proceden
**Presión parcial** – presión que ejercería uno de los gases componentes de una mezcla de gases que no reaccionan entre sí, si ocupara el volumen de la mezcla
**Regresión** – retroceso del mar más allá de los límites anteriores, con emersión de zonas mas o menos vastas, debido a un descenso del mar (eustatismo), a un levantamiento general o a un aporte de sedimentos, pudiéndose combinar estos tres fenómenos
**Subaérea** – por debajo de la zona aérea
**Tectónicas** – conjunto de deformaciones que han afectado a los terrenos geológicos posteriormente a su formación
**Tectónica de placas** – La parte superficial de la Tierra o litosfera está formada por placas rígidas, flotando sobre la astenosfera deformable, hay placas de corteza continental u oceánica
**Textura** - estructura
**Tipología** – rasgos o características hidrogeológicas y geomorfológicas
**Vadosa** – el agua que percola en el subsuelo sin formar parte del manto freático del agua subterránea

Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño
Curso Iniciación a la Espeleología
Examen – noviembre 2001

1. ¿Qué significa el término espeleología?
2. Resuma la historia de la espeleología en el mundo y en Puerto Rico.
3. ¿Qué es ética ambiental y ecológica y porque es importante?
4. ¿Qué es una tabla crono-estratigráficas con las eras geológicas?
5. Resuma la evolución geológica de Puerto Rico y de la roca caliza
6. ¿Cuántas regiones kársticas hay en Puerto Rico?
7. Resuma el pensamiento sobre la espeleogénesis
8. ¿Cómo se clasifican las rocas carbonatadas por su origen?
9. ¿Qué son aguas aciduladas?
10. ¿Cómo se forman las cavidades en la rocas carbonatadas?
11. Explique el proceso de la disolución de las rocas carbonatadas.
12. ¿Qué factores químicos afectan la disolución?
13. ¿En que zonas de la roca carbonatada se puede producir la disolución?
14. ¿Cuál es la diferencia entre la rocas calcáreo - dolomíticas y las rocas margosas?
15. ¿Qué significa y que importancia tiene la granulometría?
16. ¿Qué son estratos y que importancia tienen en la formación de las cuevas?
17. ¿Qué importancia tiene los procesos orogénicos en la formación de cavidades?
18. Mencione cuales son los factores catalizadores que hacen que la ecuación se desplace hacia la disolución o hacia la precipitación.
19. ¿Cuántas y cuales son las zonas hidrogeológicas?

20. Mencione los tipos de corrosión acelerada.

21. ¿Cuáles son los tres elementos necesarios para que haya disolución? ¿Cómo se representan químicamente?

22. ¿Cuántas y cuales son las clasificaciones espeleométricas?

23. ¿Cuál es el problema en la clasificación genética de las cavidades?

24. ¿Cuáles son las tipologías de las cavidades según su hidrología?

25. ¿Cuáles son las tipologías de las cavidades según su geomorfología?

26. ¿Cómo se forman los espeleotemas?

27. Mencione por lo menos cinco tipos distintos de espeleotemas.

28. ¿Qué es el karso?

29. Mencione alguna de las formas superficiales del karso.

30. ¿Qué es lo más básico que se requiere para la documentación?

31. ¿Cuál es el propósito de la topografía subterránea?

32. ¿Qué instrumentos necesita para la topografía subterránea?

33. ¿Qué es una Rosa de agrietamiento y cual es su objetivo?

34. ¿Qué es la espeleoclimatología y por que es importante?

35. ¿Qué instrumentos se necesitan para hacer estudios de climatología?

36. ¿Cuáles son los tres zonas principales en una cavidad desde el punto de vista bioespeleológico?

37. ¿Cómo se clasifica la fauna subterránea?