

SPELEOLOGIA SUBACQUEA: AMBIENTE FISICO



Attilio Eusebio

SPELEOLOGIA SUBACQUEA: AMBIENTE FISICO

La speleologia subacquea si svolge in vari contesti alcuni naturali, altri artificiali, percorrendo acque dolci e/o salate, in condizioni che spesso risultano aliene a chi non si è mai avventurato in questi ambienti. Abbiamo così cercato di illustrarne alcuni in modo da dare una panoramica, molto generale.

Gli ambienti naturali sono costituiti da grotte sommerse dal mare o di acqua dolce, dalle risorgenze ove i fiumi sotterranei vengono a giorno o da tratti di grotte naturali, più o meno estesi, che sono invasi dalle acque. Ambienti dove il fenomeno carsico è tuttora in evoluzione e dove lo speleosub può accedere con le dovute precauzioni. Difficile farne una classificazione anche se certamente sono facili da individuare le risorgenze dalle quali i fiumi carsici riemergono alla luce.

Analogamente gli inghiottitoi sono facilmente distinguibili, in essi i fiumi entrano nelle grotte. Infine, vi sono tutti i tratti sifonanti all'interno delle grotte stesse che, a distanza più o meno variabile dagli ingressi, vengono definiti comunemente "fond de trou" utilizzando una espressione francese dal significato incontrovertibile "fondo del buco".

Questi possono avere lunghezze e profondità variabile, l'unica cosa in comune è che per raggiungerli lo speleosub deve percorrere, con le tecniche della speleologia terrestre tratti di grotta asciutta. Quindi necessitano di una organizzazione e di materiali differenti e di una squadra di appoggio specifica.

Tra le cavità carsiche non vanno dimenticate le grotte in mare, che possono essere sia legate all'azione del mare attuale, oppure i resti di antiche grotte. In questi casi si tratta quasi sempre di grotte calcaree, ma esistono grotte marine anche in altri ambienti (basalti, colate laviche).

Generalmente sono inondate da acque salate ma spesso è presente anche l'acqua dolce.

Tra questi ambienti di origine mista vanno annoverati i cenote, i blue hole e perfino i tubi di lava che non hanno una origine carsica appunto ma possono presentare grotte anche importanti sia fossili sia subacquee. Infine, non vanno dimenticati gli ambienti artificiali come le miniere allagate, le

cisterne, le condotte e tutte le strutture costruite dall'uomo prevalentemente per sfruttamento del sottosuolo e per approvvigionamento idrico.



Foto 1 – La risorgenza della Foce, al confine tra Liguria e Piemonte (autore A.Eusebio)

1. Le risorgenze

Sono una delle manifestazioni più evidenti del carsismo, quando i fiumi vengono a giorno. Spesso gli antri o i luoghi da cui fuoriescono sono imponenti, fondovali ricchi di vegetazione in zone per lo più aride.

Nel passato molti di questi sono stato oggetto di culto e spesso sono presenti piccoli o grandi villaggi in quanto rappresentavano una fonte d'acqua sicura durante le stagioni di secca. La più famosa risorgenza è certamente la "Fontaine de Vaucluse" in Francia, nota già ai tempi dei Romani che oggi è una delle mete turistiche più famose della Provenza. Francesco Petrarca, che sarebbe stato ispirato proprio dal torrente che ne fuoriesce, compose qui i famosi versi del Canzoniere (intorno al 1340) dedicati a Laura: "Chiare, fresche et dolci acque".

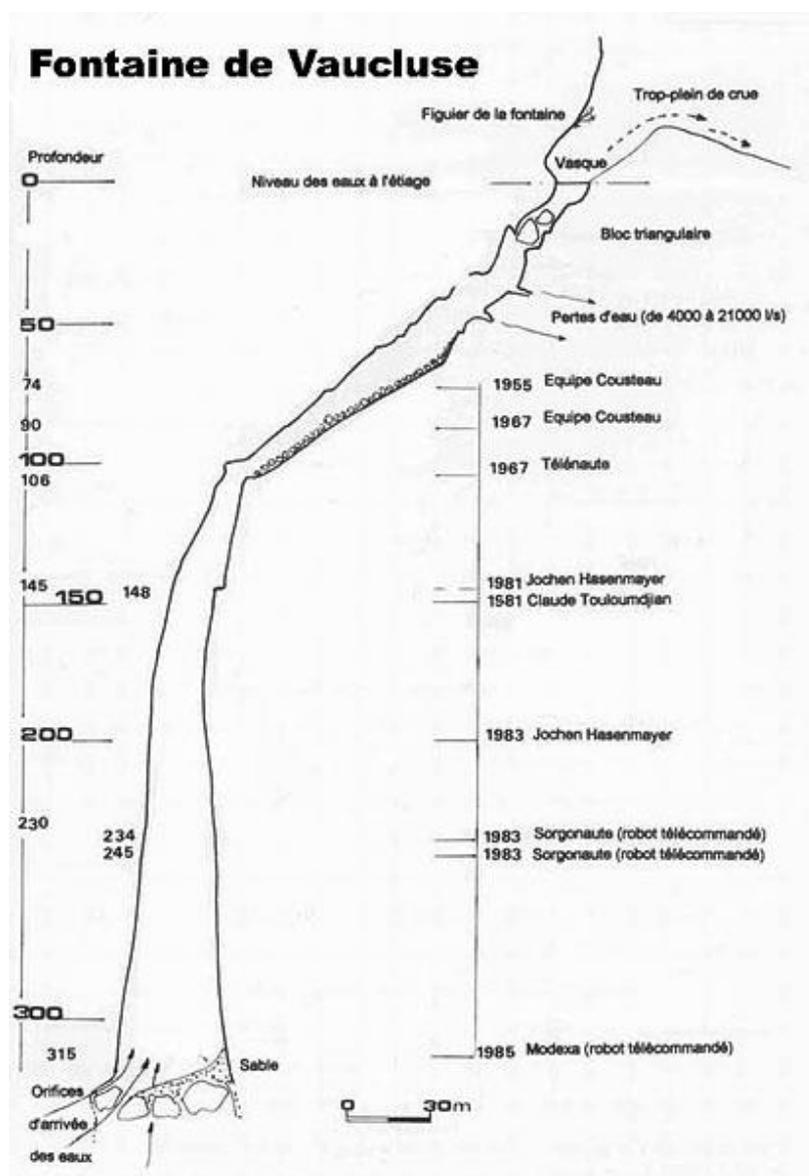


Fig. 1 – Sezione della Fontaine de Vaucluse tratta da Sezione della Risorgenza tratta da <http://www.ssfv.fr/fontaine-de-vaucluse/>

La sorgente fu anche sede dei primi cimenti degli speleosub francesi dove già nel 1878 Ottonelli raggiunse -23m. Oggi, dopo molteplici tentativi, il fondo non è stato ancora raggiunto da esseri umani, un ROV (Remotely Operated Vehicle) della spedizione Modexa Survey ha raggiunto nel 1985 la profondità di -315 metri.



Foto 2a e 2b - Ingresso della Fontana di Vaucluse in magra e in piena (autore A.Eusebio)

Molte, si diceva, sono le risorgenze note e famose, in Italia non vanno dimenticate le sorgenti del Timavo poste all'estremo oriente, in Friuli-Venezia Giulia. Qui un imponente fiume drena tutte le acque del carso triestino e sloveno e dopo un percorso in superficie si immette nel Mar Adriatico. Nasce (con il nome Reka, che significa semplicemente "fiume") in Croazia da una sorgente valchiusana del Monte Nevoso e precisamente dal picco Turkove škulje, distante solo un paio di chilometri dal confine con la Slovenia. Scorre poi nella Val Malacca; nel suo percorso sotterraneo attraversa il Carso e sfocia infine in mare nei pressi di San Giovanni di Duino, in provincia di Trieste. È famoso per via del suo lungo percorso sotterraneo di circa 40 chilometri che, dalle grotte di San Canziano in Slovenia, passando per l'Abisso di Trebiciano, raggiunge il paese di San Giovanni di Duino. Qui ricompare in superficie per poi sfociare nel Golfo di Trieste dopo un paio di chilometri. Tale percorso viene considerato come uno dei più interessanti fenomeni carsici. Anche in questo caso il fenomeno fu storicamente ricordato in particolare da Virgilio che lo menziona per ben tre volte: Egloga VIII, 6, Georgiche, libro III, 475 Eneide, libro I, 244. Con il Cristianesimo fu costruita la basilica di San Giovanni in Tuba. (IV sec).

Altre risorgenze molto famose sono situate nelle province del nord-est italiano, il Gorgazzo in Friuli profondo -222 metri (record di profondità italiano nel 2019, Starnawski), L'Elefante Bianco o Laghetto di Ponte Subiolo profondo -189 metri (Casati 2010), I Fontanazzi (-135, Casati 2015) e soprattutto le Grotte di Oliero nella valle del Brenta (provincia di Vicenza). Queste sono molto note e percorse da centinaia di speleosub ogni anno.



Foto 3 - Ingresso dell'Elefante Bianco in magra (autore A. Eusebio)

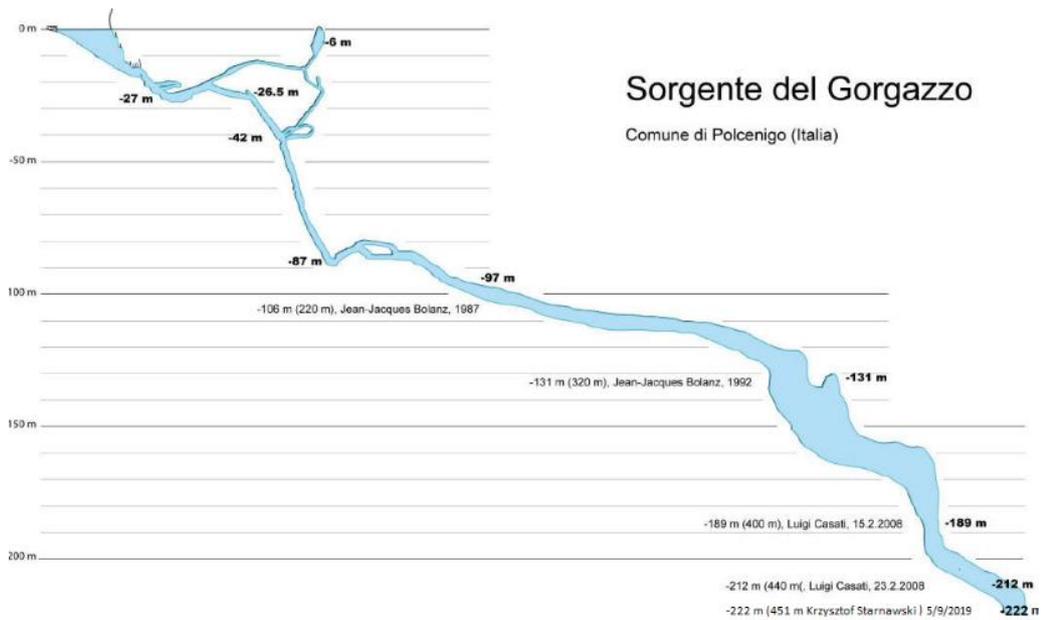


Fig. 2 - Sezione della sorgente del Gorgazzo tratta da https://www.centrosommozzatori.it/?page_id=1858



Foto 4 - Ingresso della Sorgente del Gorgazzo in magra (autore A. Eusebio)

Altre risorgenze più o meno importanti sono presenti quasi ovunque nella penisola, certamente vanno ricordate le sorgenti del Peschiera che alimentano l'acquedotto di Roma anche se non risultano transitabili da speleosub, inoltre la costa orientale della Sardegna ospita molte risorgenze tra cui va ricordata la risorgenza di Su Gologone. Questa sorgente si può considerare, con ogni probabilità, la più importante e famosa di tutta la Sardegna, con una portata idrica media di oltre 500 litri al secondo che durante le piene più imponenti può superare facilmente i diecimila litri al secondo. (anch'essa nota da tempi antichissimi si inserisce in un contesto paesaggistico e storico-archeologico unico. A due passi c'è Nostra Signora della Pietà, esempio di architettura sacra campestre). La massima profondità esplorativa fu raggiunta nel 2010 e 2012 a -135 da Alberto Cavedon.

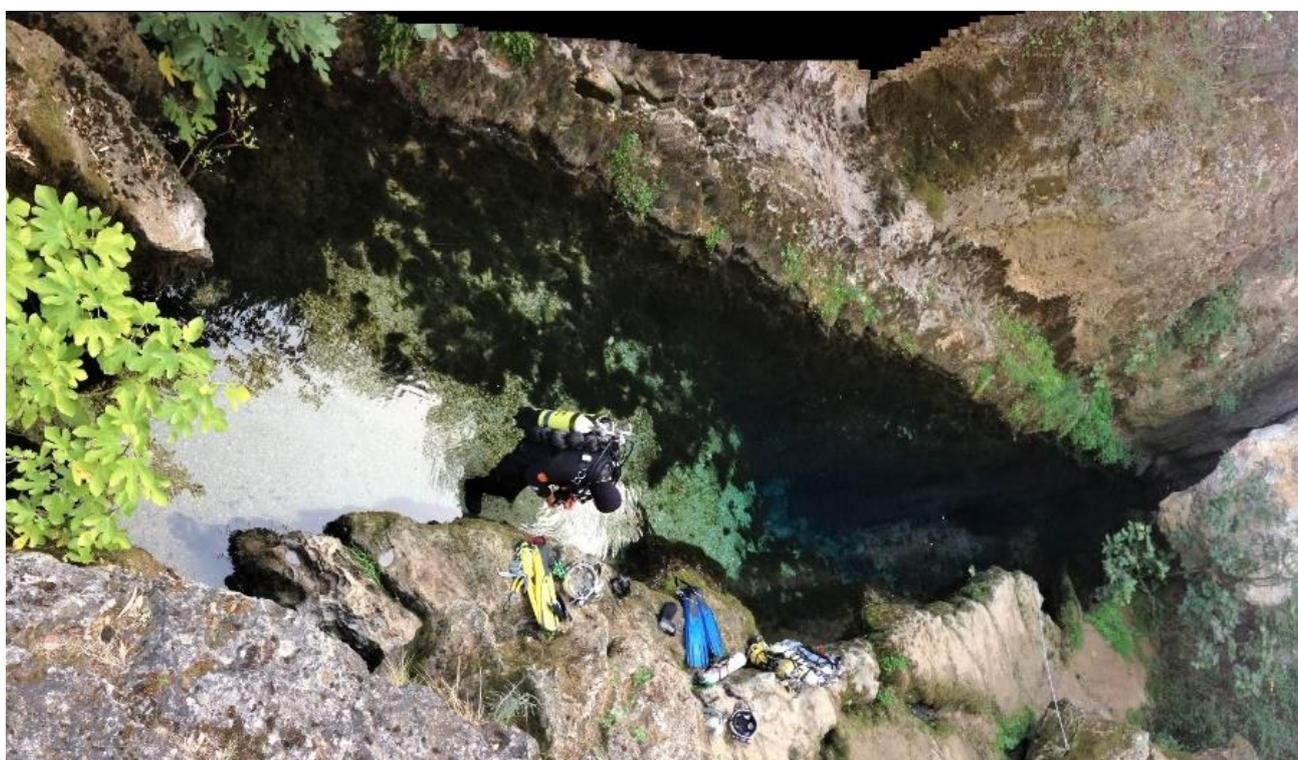


Foto 5 - Ingresso della sorgente di Su Gologone in magra (autore A. Eusebio)

Le risorgenze citate sono certamente tra le più famose, conosciute e frequentate dagli speleologi subacquei, ne esistono molte altre meno frequentate, meno note e ancora in via di esplorazione.

Citandone altre famose nel mondo non si possono dimenticare quelle in Florida e su tutte la Wakulla Spring, tempio assoluto della speleologia subacquea moderna.

In Europa, va ricordato l'imponente sistema di Pozo Azul in Spagna con alcuni dei sifoni più lunghi del mondo: è tra le grotte subacquee più estese nel vecchio continente.

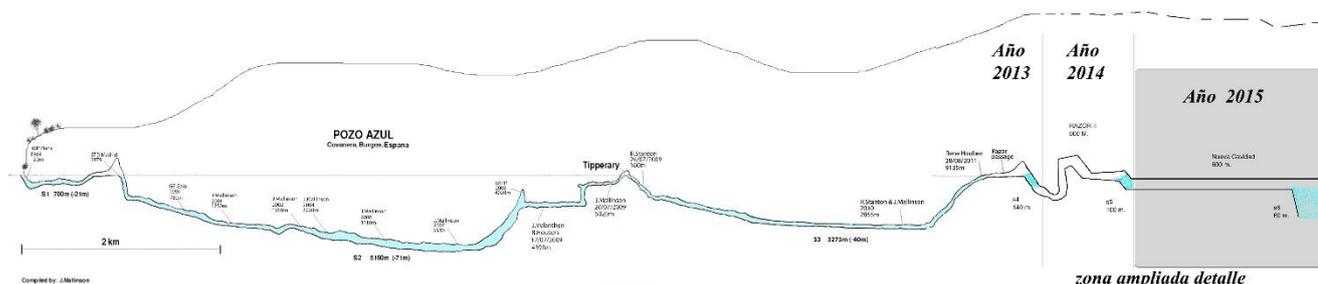


Fig 3 – Sezione del sistema Pozo Azul tratta da <https://www.niphargus.net/pozoazul.htm>. Lo sviluppo dei sifoni è di 10480 metri, mentre complessivamente la cavità si estende per 13755 metri (aggiornamento ottobre 2018)



Foto 6 - Le gallerie della Doux de Coly (autore A. Eusebio)

Infine va ricordata la fantastica Doux de Coly in Francia dove la trasparenza delle acque consente visibilità eccezionali. Sempre in Francia non va dimenticata la risorgenza di Port Miou, situata nei pressi di Marsiglia dove Xavier Meniscus raggiunse i -233 m nel 2016.

Nell'Est europeo sono note alcune risorgenze di prim'ordine nei pressi di Mostar: la Buna e La Buniva, due veri fiumi carsici che escono dal sottosuolo. Nel caso della Buna, il fiume crea un effetto fiabesco, la montagna fa da cornice ad un monastero derviscio (Blabaj Tekke) del XV secolo. La portata media è di 670m³/s.

Come si diceva centinaia sono le risorgenze in alcuni paesi, il fenomeno carsico è molto sviluppato e quindi in queste località sono la norma rappresentando un elemento comune nel paesaggio come in buona parte dell'Est europeo o della Francia meridionale.



Foto 7- L'ingresso della risorgenza della Buna in Bosnia, sul lato orografico destro il monastero derviscio (autore A. Eusebio)

L'ultima che citiamo per completezza è situata in Albania, si tratta della Burimi Karstik I Viroit, nella parte meridionale del paese a pochi chilometri da GjiroKaster. Da un immenso lago esce un fiume importante che può raggiungere una portata di 13,6 m³/s. Le prime esplorazioni italiane nel 2005 si arrestarono per la forte corrente che non permetteva il passaggio dello speleosub, dal 2013 al 2019 speleosub polacchi vi lavorarono intensamente scoprendo all'interno un pozzo di oltre 100



metri completamente allagato. Le esplorazioni ad opera principalmente di Starnawski raggiunsero nel 2016 la profondità di 279 m.

Foto 8 - Burimi Karstik I Viroit (autore A.Eusebio)

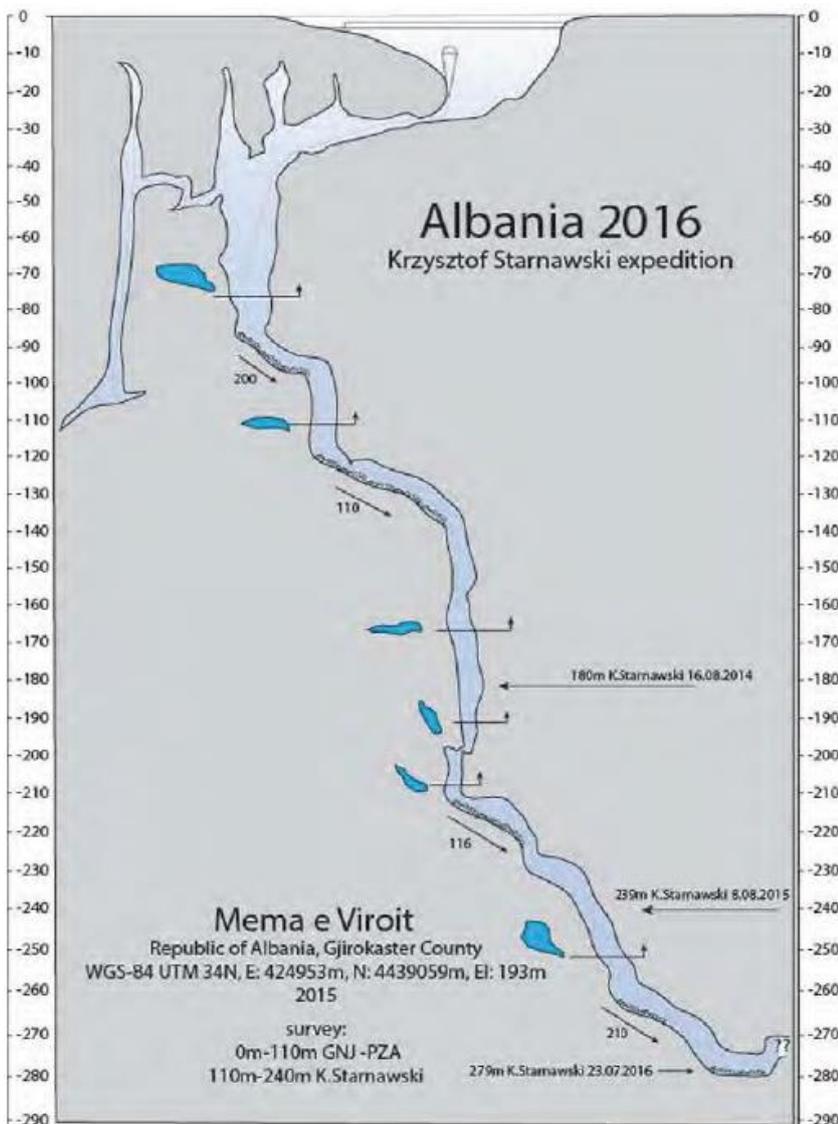


Fig.4 Sezione della risorgenza di Viroit tratta da "Polish Cave 2013-2017" Published for 17th Int. Congr. of Speleology

2. Il Fond de Trou

Come detto nella parte iniziale in molte cavità sono presenti sifoni che richiedono un avvicinamento speleologico per poter entrare in acqua. Mentre le risorgenze descritte in precedenza sono generalmente poste lungo itinerari accessibili, dove molte di esse sono raggiungibili in auto ed il trasporto del materiale è ridotto, generalmente a carico del subacqueo stesso. Per le immersioni “fond de trou” la situazione risulta completamente diversa.

Il trasporto dei materiali risulta uno degli aspetti più difficoltosi e in funzione dell’immersione che si andrà a fare sarà necessaria una squadra di appoggio e trasporto numerosa e appositamente dedicata. Inoltre il materiale da trasportare va preparato e confezionato in modo che possa affrontare pozzi, gallerie, strettoie e meandri senza che ne venga compromesso il funzionamento.

Tra le caratteristiche più comuni dei sifoni “fond de trou” è la facilità con cui l’acqua può intorbidirsi e quindi avere in sospensione argilla che ne riduce sensibilmente la visibilità. Così come le risorgive appaiono spesso con acqua trasparente e percorse da una corrente sensibile, spesso i sifoni “Fond de trou” sono caratterizzati da correnti minime ed elevata sospensione.

Si tratta, non solo per questo, di due immersioni completamente differenti, mentre alle risorgenze infatti si avvicinano anche subacquei tecnici, questo tipo di immersione in grotta è perlopiù rivolta a speleologi che vedono il sifone più come un ostacolo alla prosecuzione della grotta stessa che non raramente come una impresa sportiva, atteggiamento più classico di chi affronta le risorgive. I materiali spesso sono finalizzati a questo tipo di immersione e ridotti all’essenziale per permetterne il trasporto.

In Piemonte le cavità con sifoni che bloccano la progressione più note sono quella delle Vene, del Pis del Pesio e dell’Arma del Lupo Inferiore.

Il Pis del Pesio è la risorgenza principale della Conca delle Carsene (Marguareis). Raggiungere l’entrata, in parete, richiede già 2 ore di avvicinamento, mentre il primo sifone è situato a circa 500 m dall’ingresso. Tra i primi anni ’80 ed il 2001 vengono progressivamente oltrepassati 3 sifoni (limite attuale, Delaby), di cui il primo di 240 m di lunghezza per 45 m di profondità. Le parti sommerse sono poi intervallate da lunghi tratti semiaggati. L’acqua è a 4°-5° ed anche qui vi è il pericolo di piene improvvise.

L’Arma del Lupo Inferiore è anch’essa un’emergenza del Marguareis, con 4 sifoni. Le esplorazioni iniziarono nel 1967 (S. Peirone, D. Soderò) poi fu la volta dei francesi con Penez nel 1979 e nel 1998 con L. Casati che raggiunge la quota di -78 m nel sifone del Lago Morto. Nel 2012 viene effettuato un ennesimo tentativo da due speleosub (A. Cavedon, A. Eusebio). Durante l’immersione viene rilevata tutta la galleria e Cavedon con reb, scende a -121 m, quindi prosegue in risalita fino a -107 m per poi iniziare il rientro.

La quantità di sacchi da trasportare risultò imponente e le squadre di appoggio numerose. Nell’immersione finale all’Arma del Lupo inferiore furono necessari 62 speleologi per due giorni per trasportare l’attrezzatura di due sub, per un tragitto poco superiore al chilometro che comunque alternava gallerie, strettoie, pozzi, laghetti e traversi con corde. L’immersione in acque a 5° gradi durò 135 minuti.

In Piemonte va ricordata ancora l’esplorazione della Grotta delle Vene (sviluppo 6285 m). La grotta fu esplorata inizialmente, tra il 1954 ed il 1967 dal Gruppo Speleologico Piemontese (GSP) che superò i primi due sifoni. A partire dal 1986 e per i seguenti 12 anni le ricerche furono condotte da un gruppo belga, il Cercle Spéléo de l’Athéné Royal d’Ixelles – Bruxelles (CSARI). L’unione delle forze porta a scoprire sette sifoni con uno sviluppo superiore ai 6 km. Le difficoltà per raggiungere questo risultato sono state notevoli e lo dimostrano gli anni che ci sono voluti per raggiungerlo: 44.



Foto 9 – Immersione “Fond de Trou” all’Arma inferiore del Lupo (autore R. Zerbetto)

Le acque hanno mediamente una temperatura di 3-4° C. Considerando anche i vari tratti semiallagati tra i sifoni sono state usate mute semi-stagne da 7mm. Alcuni tratti hanno, infatti, richiesto tecniche di arrampicata in artificiale dato che complessivamente la cavità risale di circa 200 metri. La grotta inoltre è molto attiva e soggetta a piene anche improvvise. Il notevole sviluppo ha richiesto anche un campo base per le esplorazioni oltre il quarto sifone. Nell’ultima spedizione del 1998, la durata complessiva delle esplorazioni è stata di 55 ore, mentre il trasporto materiale fino a S2 ha richiesto sedici persone per un giorno intero. In quest’ultima occasione i subacquei coinvolti sono stati complessivamente sette. Il termine è oggi rappresentato da un settimo sifone situato 200 metri più in alto della quota di ingresso.

Abbiamo citato immersioni “fond de trou” italiane con i risultati maggiori, massima profondità e massimo sviluppo. Al di fuori dell’Italia molteplici sono gli esempi di esplorazioni di questo tipo certamente il più famoso è l’esplorazione della Krubera Cava in Abcasia Georgia. (Arabika massif, Western Causasus). Qui le esplorazioni cominciarono nel 1982, ma ripresero con forza solo agli inizi degli anni 2000, quando un team ucraino raggiunse -1710 m. Ma l’esplorazione non era finita lì, nel 2006, speleologi di varie nazionalità superano un primo sifone (acqua a 7°) a -1980, poi un secondo ed infine il terzo a -2146 fu più impegnativo e solo nel 2012 Gennadt Samokhin scese a -50,5 raggiungendo così la massima profondità mondiale a -2196. Questa storica esplorazione durò 34 giorni.



*Foto 10 - Immersione nel primo sifone di Riu Neri. La ridotta dimensione degli ambienti ha fatto preferire una configurazione minimalista con bombole nel sacco (Friuli Venezia Giulia)
(autore A.Eusebio)*

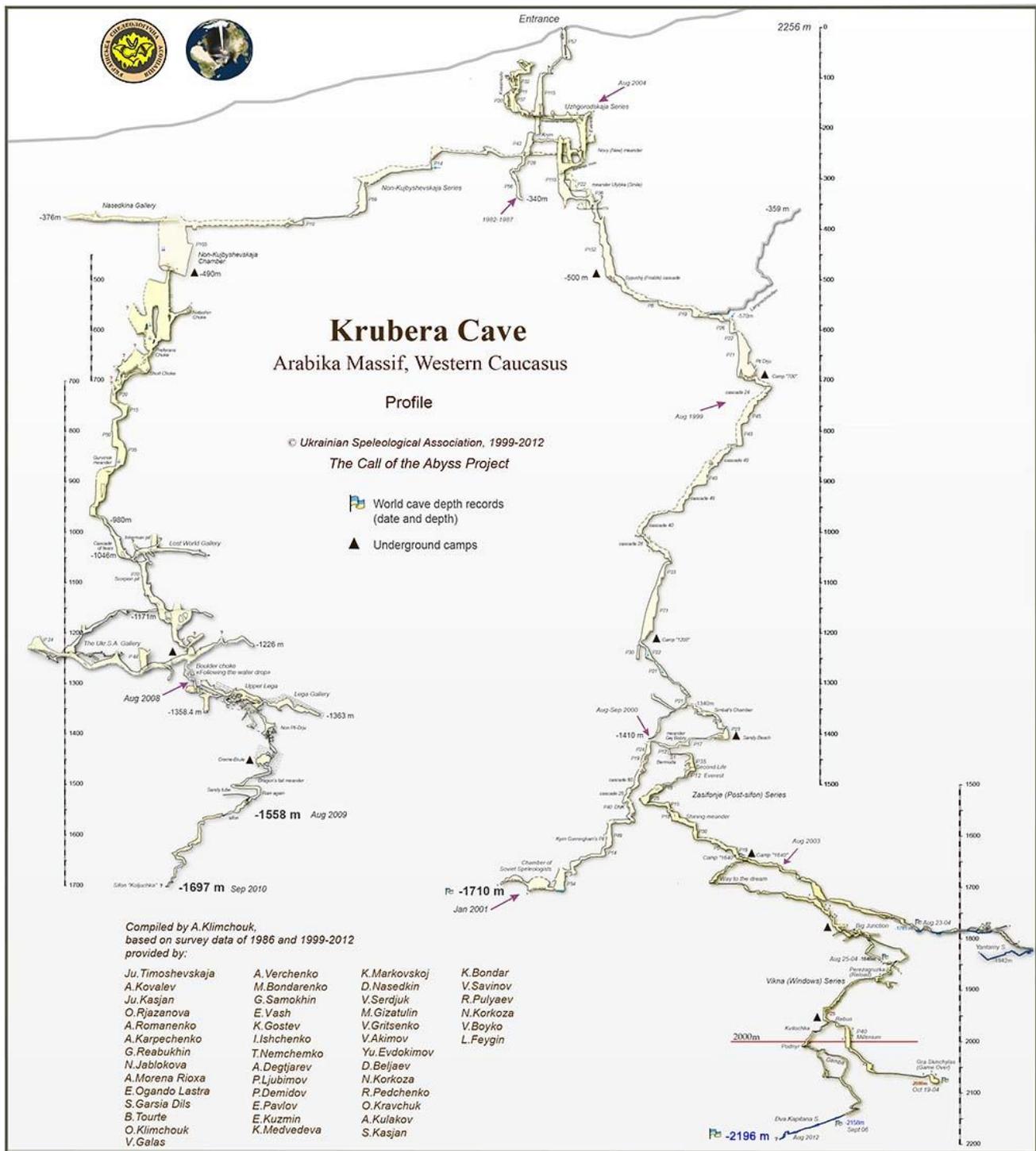


Fig. 5 – Sezione della Krubera Cave tratta da kruberacave.info/index.php/en/10-en/kruberacave/24-topographic

3. Gli inghiottitoi

E' anche questo un fenomeno carsico diffuso anche se molto meno evidente delle risorgive. Certamente gli inghiottitoi rappresentano, dal punto di vista subacqueo, un ambiente meno interessante, difficile infatti è trovare perdite di fiumi che immettano direttamente su sifoni. Inoltre, le acque d'ingresso spesso non si presentano nelle condizioni migliori e la corrente a uscire non è un fattore di sicurezza. Per molto tempo infatti sono state sconsigliate le immersioni down-stream e loro gestione deve essere programmata con molta attenzione. Non va dimenticato inoltre che gli inghiottitoi spesso sono il luogo dove si concentra ciò che il fiume ha trasportato durante le piene, da alberi e detriti grossolani, ma non è infrequente che siano anche invase da rifiuti di varia natura o da carcasse di animali.

Tutto questo non rende, perlomeno nel panorama italiano, le immersioni negli inghiottitoi particolarmente ambite.

Tuttavia, anche essi hanno il loro fascino soprattutto per lo speleologo che vede nel passaggio delle acque sottoterra una via di accesso all'inesplorato. Per lo speleosub è meno intrigante e gli inghiottitoi difficilmente



hanno laghi di ingresso, mentre è più facile che siano presenti all'interno della grotta. Ma in questo caso ricadiamo nel caso del "fond de trou".

Sicuramente l'inghiottitoio più famoso è quello del Bussento, ubicato in prossimità dell'abitato di Caselle in Pittari (SA), che si presenta ai visitatori con un maestoso ingresso, incassato tra alte pareti calcaree, oltre il quale spariscono nel buio le acque del fiume omonimo, per poi riemergere, dopo un percorso

sottterraneo di quasi 4 km in linea d'aria e un dislivello di circa 100 metri, dalla Risorgenza del Bussento, nei pressi dell'abitato di Morigerati (SA). L'immagine della pagina precedente illustra la risorgenza del sistema – Foto 11)

Queste caratteristiche lo rendono uno dei fenomeni carsici più affascinanti e imponenti della Campania e di particolare interesse speleologico a livello nazionale. La prima parte della grotta non è sifonante e il primo vero sifone si incontra dopo circa 400 metri di progressione (Sala Consolini).

Tra gli inghiottitoi più famosi va citata la Carsena di Piaggia Bella, dove il fiume superficiale scompare e una rapida sequenza di cascate disperde l'acqua in grandi gallerie. Il sistema che si è venuto a creare si sviluppa per 43 km con 15 ingressi. Le acque dopo un percorso di alcuni chilometri si gettano in un sifone non ancora esplorato e vanno a riemergere, dopo aver attraversato la grotta di La Bassa (14 km di sviluppo), all'Arma del Lupo inferiore e ancora alla risorgenza della Foce con dislivello complessivo di quasi 1900 metri.



Foto 12 - La piana di Piaggia Bella (Marguareis, Piemonte) con il torrente principale che si immerge sottoterra nella parte sinistra dell'immagine (autore A. Eusebio)

Altri inghiottitoi sono presenti nell'Italia Centrale tra questi va ricordato: l'Affondatore di Vallivona e altri minori sui Monti Cervati, Picentini, Cilento.

In questo massiccio furono effettuate le prime immersione intorno agli anni '60 da parte di speleosub romani all'inghiottitoio di Rio Torto. Nel 1989 Sbardella si immerse nell'inghiottitoio di Pian di Varla Carla. Tuttavia, nessuna di queste esplorazioni diede origine a grandi complessi carsici, le scarse condizioni di visibilità, la presenza di fango e rifiuti e di tronchi ostacolerà in modo definitivo le esplorazioni.

4. I Cenote

Attualmente il termine è usato per descrivere cavità carsiche che presentano al loro interno acqua dolce generalmente con un ingresso a pozzo più o meno profondo. Cenote deriva direttamente dalla lingua dei Maya: dzonot, cioè 'acqua sacra', reso con la grafia moderna è il nome dato in America Centrale e Messico meridionale a questi tipi di grotta con presenza di acqua dolce. In altre nazioni, come l'Australia, grotte simili sono semplicemente chiamati sinkhole e contengono, anche in questi casi, profondi laghi di acqua dolce con trasparenza cristallina che attirano speleosub da tutto il mondo.

La maggior concentrazione dei Cenotes è in Messico, in una zona particolarmente limitata dello Yucatan, nella regione di Quintana Roo.

Una curiosità sono i nomi storici della maggior parte dei cenote e delle grotte di Quintana Roo. Gran parte di questi è dovuta alla storia isolata e spesso turbolenta dell'area. Le caratteristiche

carsiche prossimali alla costa o una rovina Maya potrebbero conservare un nome storico o tradizionale, ma questo non è comune. Le prime esplorazioni di grotte sottomarine in questa regione iniziarono nel 1985, dove la formalità di nominare una grotta fu lasciata agli esploratori originali. Queste grotte condividono il loro nome con un cenote distintivo (spesso l'ingresso principale della caverna).



Foto 13 - Gallerie concrezionate in acque dolci nella regione dello Yucatan (cenote Nohoch Nah Chich) (autore A. Eusebio)

Alcuni hanno intitolato la loro scoperta con una breve frase Maya o spagnola che descrive una caratteristica o la personalità della grotta. I nomi delle cavità di oggi potrebbero anche onorare un proprietario terriero o persino un titolo di film popolare. È anche comune per i proprietari terrieri battezzare la propria “vasca privata” con un titolo appropriato che celebra il nome del loro ranch o proprietà.

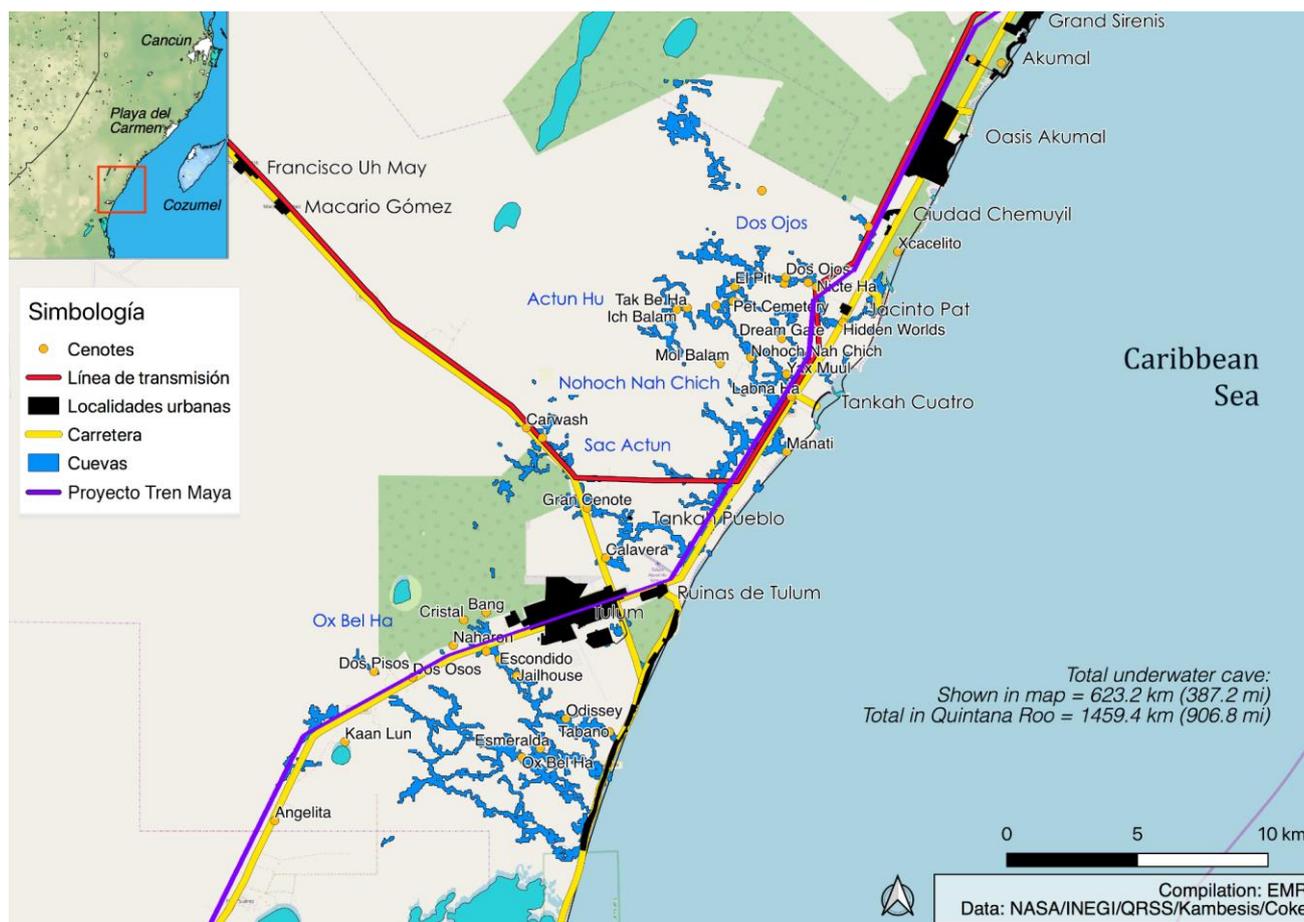


Fig. 6– La zona del Quintana Roo dove si concentrano le cavità tratta da <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/category/cenotes/>

La zona del Quintana Roo è il settore dove si concentrano la maggior parte delle cavità subacquee e aeree. La storia geologica della piattaforma dello Yucatan è difficile da ricostruire a causa della scarsità di dati. Dati profondi sono assenti, gli strati esposti sono limitati e la relativa inaccessibilità della giungla rendono difficile una ricostruzione della struttura geologica profonda. Solo la ricerca di potenziali riserve di petrolio nei primi anni '70, permise alla PEMEX (Petroleos Mexicanos) la perforazione di 10 pozzi esplorativi, fino a raggiungere una profondità di circa 2000 metri. Questi dati riassumono la stratigrafia della porzione istmica messicana della penisola dello Yucatan come quella di una grande piattaforma calcarea. I più antichi sedimenti sono paleozoici (età dei sedimenti quindi da 540 a 250 milioni di anni) e si ritrovano oltre i 2000m di profondità. I primi sedimenti mesozoici (150 milioni di anni) sono di colore rossastro (Formazione Todos Santos) e sovrastano la sequenza paleozoica in discordanza angolare, mantenendo uno spessore medio di oltre 100 m.

Il periodo Cretaceo (da 145 a 66 milioni di anni fa) fu l'inizio delle numerose trasgressioni marine che avrebbero sommerso gran parte di questo istmo con caldi mari e poco profondi fino al Pleistocene (da 2,5 a 0,1 milioni di anni fa). Durante questo periodo si formarono oltre 1300 m di calcare variamente stratificato, mentre durante il periodo terziario (da 65 a 2,5 milioni di anni fa) furono depositati altri 1000 m di sedimenti carbonatici essenzialmente puri.

Il sollevamento nella zona centro-meridionale dell'istmo iniziò nell'Oligocene (da 33 a 23 milioni di anni fa). Questo lento sollevamento è continuato fino al Pleistocene (all'incirca due milioni

di anni fa). Attualmente l'area oggetto di esplorazione è una pianura carsica a bassorilievo (altezza 3-16 m) che sostiene una falda poco profonda, lunga circa 40 km e larga poco meno di 10. L'intensità del carsismo è eccezionale ed è legata soprattutto alle miscele tra acque dolci (che hanno un flusso prevalente verso l'oceano) e quelle salate che costituiscono la base su cui questa lente di acqua dolce scorre lentamente.

L'area riceve oltre 1500 mm di pioggia all'anno. L'anidride carbonica atmosferica conferisce una leggera acidità a queste precipitazioni. A contatto con il suolo le precipitazioni assorbono gli acidi tannici dalla zona superiore degli strati calcarei. Sia la caliche (deposito indurito di carbonato di calcio che cementa materiali litici, come ciottoli di ghiaia, granelli di sabbia e depositi di argille).

Gli strati originari sono molto porosi, favorendo una rapida percolazione verso il basso a contatto con le acque dolci poco profonde. L'aggressività delle acque piovane cariche di CO₂ e di acidi tannici esalta i processi corrosivi miscelandosi con le acque dolci e creando gli spettacolari antri di ingresso di molti cenote.



*Foto 14 - Gallerie concrezionate in acque dolci nella regione dello Yucatan (cenote Tux Kubaxa)
(autore A. Eusebio)*

Le fluttuazioni del livello del mare durante i periodi post-glaciali hanno accelerato lo sviluppo dei sistemi di grotte. Le variazioni del livello del mare durante le fasi glaciali ha comportato un notevole calo della falda freatica e quindi dell'acqua nei canali di drenaggio. Circa 18.000 anni fa il livello marino discese dall'attuale fino a -125m, per risalire lentamente durante il periodo successivo. Questo abbassamento relativamente improvviso comportò il conseguente abbattimento della falda

freatica con lo svuotamento dei condotti carsici da parte dell'acqua. Le gallerie iniziarono i loro processi di concrezionamento ed i soffitti delle grandi caverne, non più sostenuti dalla pressione delle acque, crollarono creando nuove aperture carsiche verso l'esterno. L'erosione dei torrenti progressivamente ampliò le grotte esistenti, creando nuovi passaggi nelle zone calcaree più profonde esplorate fino a -100 m. Il risultato fu che la tavola di acqua dolce, precedentemente discesa fino al livello del mare, fu nuovamente innalzata spinta dall'intrusione di acqua salata che proveniva dall'oceano, i condotti più profondi furono rapidamente immersi da questa intrusione. Le parti intermedie rimasero interessate da entrambi gli strati di acqua dolce e salata e questi tuttora interagirono liberamente all'interno delle grotte aumentando notevolmente, con la miscelazione, la capacità corrosiva. I livelli superiori furono infine inondati dalla falda acquifera dolce. Alla fine, tutto fu sommerso. La maggior parte dei sistemi di grotte arrivarono ad essere inondati sia da strati di acqua dolce che salata.

Questo tipo di cavità, dove acque dolci e salate convivono apparentemente isolate, sono definite con il termine "anchialina".

Molti sistemi di grotte nella parte orientale della Quintana Roo hanno queste caratteristiche. Contengono acque salate o salmastre che fluttuano con le maree oceaniche, anche se manca una connessione superficiale con l'oceano. Le grotte anchialine nell'area di studio contengono uno strato superiore di acqua dolce che scorre su un'intrusione di acqua salata quasi statica. Si verifica così una zona di miscelazione (animata dalla corrente d'acqua e dalla configurazione dei passaggi) in corrispondenza di un'interfaccia a densità distinta tra i due strati. La profondità dell'aloclino e lo spessore dello strato di acqua dolce aumentano con la distanza dall'oceano, con conseguente riduzione dei cloruri in acqua dolce. Quello che colpisce in modo particolare, è l'intensità del fenomeno carsico e le indagini condotte hanno concluso che la maestosità del fenomeno è collegata a tre fattori principali:

- dissoluzione preferenziale del calcare nella zona di miscelazione delle acque
- apporti acidi derivanti dalle precipitazioni esterne collegata alla natura stessa dei materiali
- presenza di un sistema pervasivo di fratturazione.

Le moderne tecniche di immersione in grotta hanno permesso agli esploratori di studiare questi condotti sommersi a molti chilometri di distanza dai loro ingressi scoprendo alcuni dei sistemi di grotte sottomarine più estesi del mondo. L'immersione in grotta come attività di ricerca è stata adottata da molte discipline, portando a numerose scoperte in ambito idrologico, archeologico e biospeleologico.

Lista delle maggiori cavità carsiche sommerse in Quintana Roo Mexico last updated 11 April, 2020
(<http://caves.org/project/qrss/qrlong.htm>)

	Nome	Lunghezza (metri)	Profondità (metri)	N* di Cenotes nel sistema	Reported	Data
1	Sistema Sac Actun	364396	-119.2	226(?)	Reato/GAM/Leal	04/2019
2	Sistema Ox Bel Ha	271026	-57.3	143(?)	A.Coffield-Feith	08/2018
3	Sistema K'oox Baal	99597	-26.2	57(?)	Reato/Czech Speleo. Society	07/2019
4	Sistema Xunaan Ha	52214	-27.1	31	Quiet Diver Team	05/2013
5	Sistema Toh Ha	47746	-12.8	21	Berni/Sieff	12/2018
6	Sistema Caterpillar	28253	-29.0	10(?)	DRSS/QDT	05/2019
7	Sistema Sand Crack	26746	-17.7	8(?)	Quiet Diver Team/DRSS Rouquette-Cathala/Quiet Diver Team/DRSS	06/2013 08/2014
8	Sistema Nohoch Pek	25160	-18.6	8		
9	Sistema Nohoch Kai	17498	-25.9	11	Proyecto Nohoch Kai	05/2018
10	Sistema Zapote	16768	-28.0	11	Zapote Project Group	11/2018
11	Sistema Doggi	16308	-15.5	8(?)	Quiet Diver Team/DRSS	03/2019
12	Entrada Caapechen	15638	-34.7	1	Yaxchen Project/MCEP/CINDAQ	10/2015
13	Sistema Dos Pisos	14756	-24.4	5	Berni/Sieff	11/2019
14	Sistema Murena-Aak Kimin	14269	-68.6	19(?)	G. Brown/Quiet Diver Team	03/2014
15	Sistema Camilo	13442	-25.0	7	Cleveland/Sampson Gibb//Rouquette- Cathala/Bogaerts Czech and Slovak Speleological Societies	04/2016 06/2019 07/2016
16	Sistema Pandora	12441	-22.6	6		
17	Sistema Sac Kai (Paachil Nah)	11844	-15.5	15		
18	Cueva Quebrada	11555	-9.4	13	Neto/Ormeroid	07/2014
19	Entrada Boca Paila	11402	-26.8	1	CINDAQ/MCEP	10/2015
20	Sistema MOAC	11369	-16.8	9	GAM	04/2018

5. I Blu Hole

I "Blue Hole" sono grandi caverne marine o doline sommerse, che sono aperte in superficie e si sono sviluppate in una barriera o isola composta da un substrato roccioso di carbonato (calcare o barriera corallina). La loro esistenza fu scoperta per la prima volta alla fine del XX secolo da pescatori e subacquei ricreativi. I "Blue Hole" contengono tipicamente acqua influenzata dalle maree, con acque miste, dolci o salate. Si estendono sotto il livello del mare per la maggior parte della loro profondità e possono fornire accesso a passaggi di grotte sommerse. Esempi noti si possono trovare nel Mar Cinese Meridionale (Dragon Hole), Belize (Great Blue Hole), Bahamas (Dean's Blue Hole), Guam, Australia (nella Grande Barriera Corallina) e Egitto (nel Mar Rosso).

Sono depressioni approssimativamente circolari, con pareti ripide, e così chiamate per il contrasto forte tra il blu scuro, le acque profonde delle loro profondità e il blu più chiaro delle secche intorno a loro. La loro circolazione dell'acqua è scarsa e sono comunemente anossici al di sotto di una certa profondità; questo ambiente è sfavorevole per la maggior parte della vita marina, ma nonostante può supportare un gran numero di batteri. Il colore blu intenso è causato dall'elevata trasparenza dell'acqua ed esaltato dalla sabbia bianca carbonatica.

Il "Blue Hole" più profondo del mondo raggiunge 300,89 metri di profondità e si trova nel Mar Cinese Meridionale ed è chiamato Dragon Hole, o Longdong. Il secondo con ingresso sottomarino a 202

metri è il Dean's Blue Hole, situato in una baia a ovest di Clarence Town a Long Island, Bahamas. Altri sono profondi circa la metà e raggiungono i 100-120 metri. Il diametro dell'ingresso superiore varia tipicamente da 25 a 35 metri (Dean's Blue Hole) a 300 metri (Great Blue Hole in Belize).

Il "Blue Hole" più esteso in generale (tenendo conto della profondità e della larghezza) si trova a 100 chilometri dalla costa del Belize. Il Great Blue Hole è enorme con 300 metri di larghezza e 125 metri di profondità.

Si sono formati durante le ere glaciali del passato, quando il livello del mare era di 100-120 metri inferiore a quello attuale.



Foto 15 - Un blue hole a Malta, sul isola di Comino (autore A.Eusebio)

La maggior parte dei "Blue Hole" contiene acqua dolce e salata. L'aloclino è il punto in cui l'acqua dolce incontra l'acqua salata e dove si verifica una reazione corrosiva che intacca la roccia. Questo può creare nel tempo passaggi laterali, o "livelli" orizzontali, che si estendono dalla caverna verticale. Questi passaggi laterali possono essere piuttosto lunghi; ad esempio, oltre 600 metri nel caso del Sawmill Sink alle Bahamas. Al loro interno sono stati scoperti molti fossili che indicano il tipo di forme di vita che esistevano nei "Blue Hole". Sono state ritrovate anche altre forme di vita e fossili marini; fossili di coccodrillo e tartaruga. Importanti colonie batteriche sono state trovate al loro interno. A causa delle condizioni anaerobiche, sono costretti a vivere di composti di zolfo come l'idrogeno solforato, che sono tossici per la maggior parte degli organismi. Questi batteri speciali hanno prodotto molte informazioni sulla chimica e la biologia della vita microbica.

L'esplorazione dei "Blue Hole" richiede un livello estremamente elevato di esperienza nel campo delle immersioni, da qui il fatto che pochissimi subacquei l'hanno mai provata.

Nel 2009, tuttavia, un gruppo di scienziati ha deciso di analizzare sette di questi alle Bahamas. Attraverso più di 150 immersioni, guidati da Keith Tinker, hanno studiato i batteri in grado di vivere in ambienti anossici.

Nel 2018, un altro gruppo di scienziati ha esplorato il Great Blue Hole del Belize utilizzando due sottomarini della tecnologia più recente. Uno dei maggiori contributi scientifici derivanti da questa spedizione fu la prima mappa tridimensionale del suo interno. I ricercatori hanno visualizzato stalattiti, lo strato di idrogeno solforato e altri dettagli che di solito non possono essere visti ad occhio nudo. Nell'ambito di uno studio triennale, un gruppo di scienziati ha deciso di esplorare da maggio e settembre 2019 un "Blue Hole" chiamato "Amberjack Hole" situato a 30 miglia al largo della costa di Sarasota, in Florida. Alla spedizione hanno partecipato studiosi del Mote Marine Laboratory, della Florida Atlantic University, della Harbor Branch, del Georgia Institute of Technology, dello United States Geological Survey e del NOAA Office of Ocean Exploration. La spedizione ha raccolto informazioni sulla vita intorno e all'interno della cavità, sulla composizione dell'acqua di mare e sui sedimenti sul fondo.

In contrasto con le varie spedizioni di successo completate, molti esploratori sono morti nei loro tentativi di raggiungere il fondo di un "Blue Hole". Il Red Sea Blue Hole situato in Egitto a Dahab è soprannominato il "Cimitero dei subacquei" perché vi sono morti almeno 40 subacquei.



Foto 16 - il celeberrimo Red Sea Blue Hole a Dahab in Egitto (autore A. Eusebio)

6. Tubi di lava

Per quanto non faccia parte dei sistemi carsici, la genesi di grotte si può sviluppare anche in altri materiali, in particolare i tunnel di lava (o tubi di lava) è un tipo di grotta rinvenibile in rocce laviche.

A differenza degli altri tipi di grotta, l'acqua e la fratturazione non sono più fattori ed agenti determinanti nella sua genesi.

I tubi di lava sono grotte estremamente particolari, perché sono la forma fossile di ciò che fu un'eruzione di lava molto fluida. Le lave fluide, (le più comuni di composizione basaltica, ma ne esistono anche di tipo differente) sono lave che vengono eruttate ad una temperatura oscillante tra i mille ed i milleduecento gradi Celsius, da vulcani con caratteristiche geologicamente ben definite. I fiumi di lava fluida che vengono sprigionati dai vulcani, durante il fenomeno effusivo creano essi stessi uno o più tubi, grazie ad un fenomeno di "roofing" ossia la costruzione della volta del tunnel dovuta al raffreddamento e quindi consolidamento della porzione esterna della colata lavica. Questi formano in tal modo una parete solida rocciosa che mantiene all'interno del tubo una temperatura elevata tale da garantire lo stato fluido della lava che prosegue il suo scorrimento, fluendo verso valle. Alla conclusione dell'evento effusivo, il tubo si svuota e lentamente avviene il raffreddamento definitivo.

Rimane, così, una galleria vuota, che risulta percorribile dagli speleologi. La maggior parte dei tubi di lava possiede uno sviluppo suborizzontale, ma non sono rari i casi, come per la grotta dei tre livelli sull'Etna, in cui la morfologia è caratterizzata da pozzi. Famosi sono i tubi delle isole Hawaii, dell'isola della Réunion, delle Canarie (Jaime de Agua) delle Galapagos e del sopracitato Etna, le uniche in Italia.



Foto 17 - Una grotta lavica alle isole Galapagos (autore A. Eusebio)