

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 35-80	Trieste 2025
--	----------------	-----------	--------------

ALBERTO GIORGI¹

KUČKE PLANINE (MONTENEGRO): NUOVE CAVITÀ, PROCESSI GLACIOCARSICI E SPELEOGENESI NELLE ALPI DINARICHE MERIDIONALI

ABSTRACT

This research integrates traditional speleological methodologies with modern technologies, utilizing drones and GIS for the optimization of exploratory strategies, representing a significant methodological advancement in speleological research in high-altitude areas with complex morphologies. During the campaigns, 41 caves were explored and surveyed, enabling the identification of two distinct morphogenetic types: epigeal degradation caves of Quaternary age and pre-Quaternary.

Type 1 caves manifest dominant structural control with shafts developed along vertical discontinuities, limited depths (5-30 meters), and morphologies attributable to weathering processes and epigeal karst of Quaternary age. Type 2 caves instead present articulated architectures with sequences of shafts and connected chambers, greater depths (up to 140 meters), evidence of ancient water flow and vestigial speleothems, indicative of pre-Quaternary speleogenesis under phreatic/epiphreatic regime.

Geological analysis revealed the presence of extensive Triassic, Jurassic, and Cretaceous carbonate formations characterized by intense fracturing due to tectonic activity and glacio-karstic processes. The climatic framework of the area, characterized by alpine conditions with marked seasonal variations, prolonged snow regime (4-6 months), and abundant precipitation (1800-2500 mm annually), exerts fundamental control on karstification processes.

Paleogeographic reconstruction suggests that Type 2 caves formed during the Upper Miocene-Pliocene under geomorphological, hydrographic, and climatic conditions profoundly different from present ones, while Type 1 caves document the predominance of recent morphogenetic processes. The presence of persistent glacial deposits in numerous caves testifies to the interaction between karstic and glaciokarstic processes, with significant paleoclimatic implications for understanding the Quaternary evolution of the Dinaric area.

RIASSUNTO

La presente ricerca ha integrato metodologie speleologiche tradizionali con tecnologie moderne, utilizzando droni e GIS per l'ottimizzazione delle strategie esplorative, rappresentando un significativo avanzamento metodologico nella ricerca speleologica in aree di alta quota e morfologie complesse. Durante le campagne sono state esplorate e topografate 41 cavità, permettendo l'identificazione di due tipologie morfogenetiche distinte: cavità di degradazione epigea quaternaria e cavità pre-quaternarie.

Le grotte di Tipo 1 manifestano controllo strutturale dominante con pozzi impostati su discontinuità verticali, profondità limitate (5-30 metri) e morfologie riconducibili a processi di weathering e carsismo epigeo di epoca quaternaria. Le cavità di Tipo 2 presentano invece architetture articolate con sequenze di

¹ Commissione Grotte “Eugenio Boegan”.

pozzi e vani collegati, profondità superiori (fino a 140 metri), evidenze di flusso idrico antico e speleotemi vestigiali, indicative di speleogenesi pre-quadernaria in regime freatico/epifreatico.

L'analisi geologica ha evidenziato la presenza di estese formazioni carbonatiche triassiche, giurassiche e cretache caratterizzate da intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi glacio-carsici. Il quadro climatico dell'area, caratterizzato da condizioni alpine con marcate variazioni stagionali, regime nivale prolungato (4-6 mesi) e precipitazioni abbondanti (1800-2500 mm annui), esercita un controllo fondamentale sui processi di carsificazione.

La ricostruzione paleogeografica suggerisce che le cavità di Tipo 2 si siano formate durante il Miocene superiore-Pliocene in condizioni geomorfologiche, idrografiche e climatiche profondamente diverse dalle attuali, mentre le cavità di Tipo 1 documentano la predominanza di processi morfogenetici recenti. La presenza di depositi glaciali persistenti in numerose cavità testimonia l'interazione tra processi carsici e glaciocarsici, con significative implicazioni paleoclimatiche per la comprensione dell'evoluzione quadernaria dell'area dinarica.

INTRODUZIONE

L'altopiano di Kučke Planine (a volte citato nella letteratura internazionale come Žijovo Range) è situato al confine tra Montenegro e Albania, e rappresenta uno dei settori meno conosciuti e remoti del sistema carsico dinarico meridionale. Quest'area, caratterizzata da quote elevate (1800-2000 m s.l.m.) e da estese formazioni carbonatiche principalmente mesozoiche, costituisce un laboratorio naturale ideale per lo studio dei processi speleogenetici in ambiente di alta montagna, dove l'interazione tra carsismo, tettonica e dinamiche glacioquadernarie ha prodotto notevoli fenomeni ipogei. Nonostante l'importanza geomorfologica delle Alpi Dinariche nel panorama carsico europeo, le conoscenze sui sistemi d'alta quota di questa zona rimangono frammentarie in quanto sono rimaste sostanzialmente inesplorate dal punto di vista speleologico.

Le spedizioni condotte dalla Commissione Grotte Eugenio Boegan (CGEB) di Trieste (Italia) tra il 2022 e il 2025 sull'altopiano di Kučke Planine hanno colmato questa lacuna conoscitiva attraverso un approccio multidisciplinare. Dopo le brevi ricognizioni preliminari del 2022 e 2023, il progetto è divenuto pienamente operativo con due campagne (2024 e 2025) della durata di dieci giorni ciascuna, che hanno impegnato squadre di sei e dodici persone rispettivamente e utilizzato GIS e droni ad alta definizione per l'ottimizzazione delle strategie esplorative in ambiente carsico d'alta quota.

Obiettivi e strategie operative

La campagna del 2024 ha mirato alla ricognizione sistematica, all'esplorazione e alla documentazione topografica delle cavità individuate durante le esplorazioni preliminari, integrando i rilievi speleologici con indagini geologiche e analisi geomorfologiche. La spedizione del 2025, composta da undici speleologi e un geologo, ha completato le esplorazioni interrotte l'anno precedente, individuato e mappato nuovi sistemi ipogei, e condotto un rilevamento geomorfologico estensivo finalizzato alla comprensione dei processi morfogenetici.

La presente ricerca si propone di fornire un contributo significativo alla conoscenza della speleogenesi dinarica attraverso la caratterizzazione di 41 nuove cavità e la definizione di un modello evolutivo che distingue sistemi pre-quadernari da morfologie di degradazione recente, con importanti implicazioni per l'esplorazione e per la ricostruzione paleoclimatica e paleogeografica dell'area.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL MONTENEGRO

2.1.1 Geografia

Il Montenegro è situato nell'Europa sudorientale, all'interno della regione balcanica, e confina con Croazia, Bosnia ed Erzegovina, Serbia, Kosovo, Albania e il Mare Adriatico. Dal punto di vista geografico, il paese si articola in tre regioni distinte per caratteristiche climatiche, litologiche, idrografiche e vegetazionali: la regione Costiera, la regione Centrale e quella Settentrionale-Nordorientale (FRANKL et al., 2016).

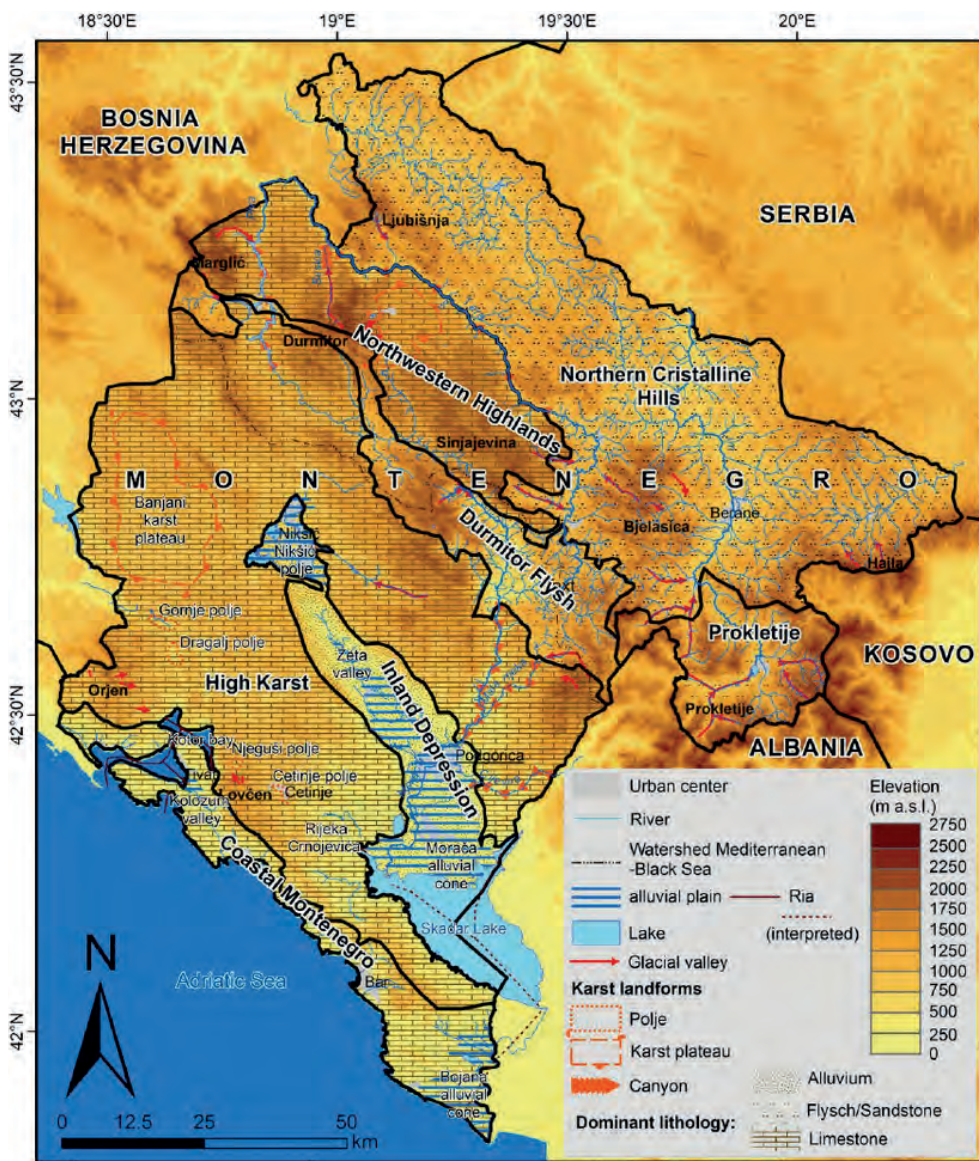


Fig. 1 - Carta geografica-geomorfologica del Montenegro (FRANKL et al., 2016).

Regione Costiera

Questa regione è costituita da una stretta fascia litoranea dominata da imponenti rilievi calcarei che si innalzano direttamente dal mare fino a circa 800 metri di altitudine. Il clima è di tipo mediterraneo, con inverni miti e piovosi ed estati lunghe, calde e aride. Il fiume Bojana, al confine con l'Albania, è il principale corso d'acqua della regione e funge da emissario del Lago di Scutari, drenandone le acque nel Mare Adriatico. La vegetazione è dominata dalla macchia mediterranea.

Regione Centrale

La regione centrale è formata da un altopiano carsico, inciso da una depressione colmata da sedimenti fini. Nelle zone di bassa quota il clima, ancora di stampo mediterraneo, assume caratteri più continentali nelle valli interne. Procedendo verso nord, il carattere continentale si accentua, poiché le Alpi Dinariche agiscono come una barriera naturale tra le masse d'aria mediterranee e quelle continentali.

Data la sua natura prevalentemente carsica, l'idrografia della regione è particolarmente complessa, con numerosi bacini che defluiscono in un reticolo idrografico sotterraneo. I principali corsi d'acqua, il Morača e lo Zeta, confluiscono nel Lago di Scutari. Dal punto di vista vegetazionale, predominano le foreste di tipo mediterraneo.

Regione Settentrionale e Nordorientale

Le aree settentrionali e nordorientali del Montenegro presentano un carattere prevalentemente montuoso, con valli profondamente incise nelle formazioni calcaree, alternate a zone più collinari e densamente popolate dove si trovano le città di Pljevlja e Bijelo Polje. Qui si trovano le cime più elevate del paese, tra cui spiccano il Bobotov Kuk (2.522 m) nel massiccio del Durmitor, la Zla Kolata (2.535 m) nei monti Prokletije e i monti Surdup (2184 m) e Stitan (2052 m) nell'altopiano di Kučke Planine. Il clima è continentale, caratterizzato da inverni freddi ed estati calde e umide.

I fiumi di questa regione come la Tara e la Piva scavano profondi canyon nelle rocce calcaree. L'area è caratterizzata da diverse tipologie vegetazionali, che includono foreste subalpine di latifoglie, pinete ad altitudini maggiori e praterie alpine sugli altipiani.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DEL MONTENEGRO

Il Montenegro presenta una struttura geologica definita dalla sua posizione chiave nel sistema orogenetico delle **Dinaridi**, nate dalla collisione tra la placca Adria e quella Eurasiatica.

La regione riflette una storia tettonica assai complessa fatta di sovrascorrimenti, pieghe e intensi movimenti compressivi che hanno organizzato le successioni stratigrafiche in grandi unità geologiche. (KALUĐEROVIĆ & MIHAJLEVIĆ, 2021).

Unità geologiche principali

- **Alto Carso (High Karst):** in questa unità si colloca l'altipiano di Kučke Planine; rappresenta la regione geomorfologica più continua e omogenea del Montenegro, costituita da:
- **Triassico:** formazioni di calcari nodulari, dolomie, radiolariti e carbonati di piattaforma del tardo Triassico, con facies variabili tra laguna e mare aperto.
- **Giurassico:** calcari ammonitici, pelagici, selciferi e di piattaforma, che segnano i processi di approfondimento e transizione ambientale.
- **Cretaceo:** calcari massicci a strati di elevata potenza, fortemente fratturati, rappresentano la litologia prevalente della zona carsica sommitale e degli altipiani più estesi.
- **Unità Durmitor (Flysch):** caratterizzata da una sequenza sedimentaria clastica che in-

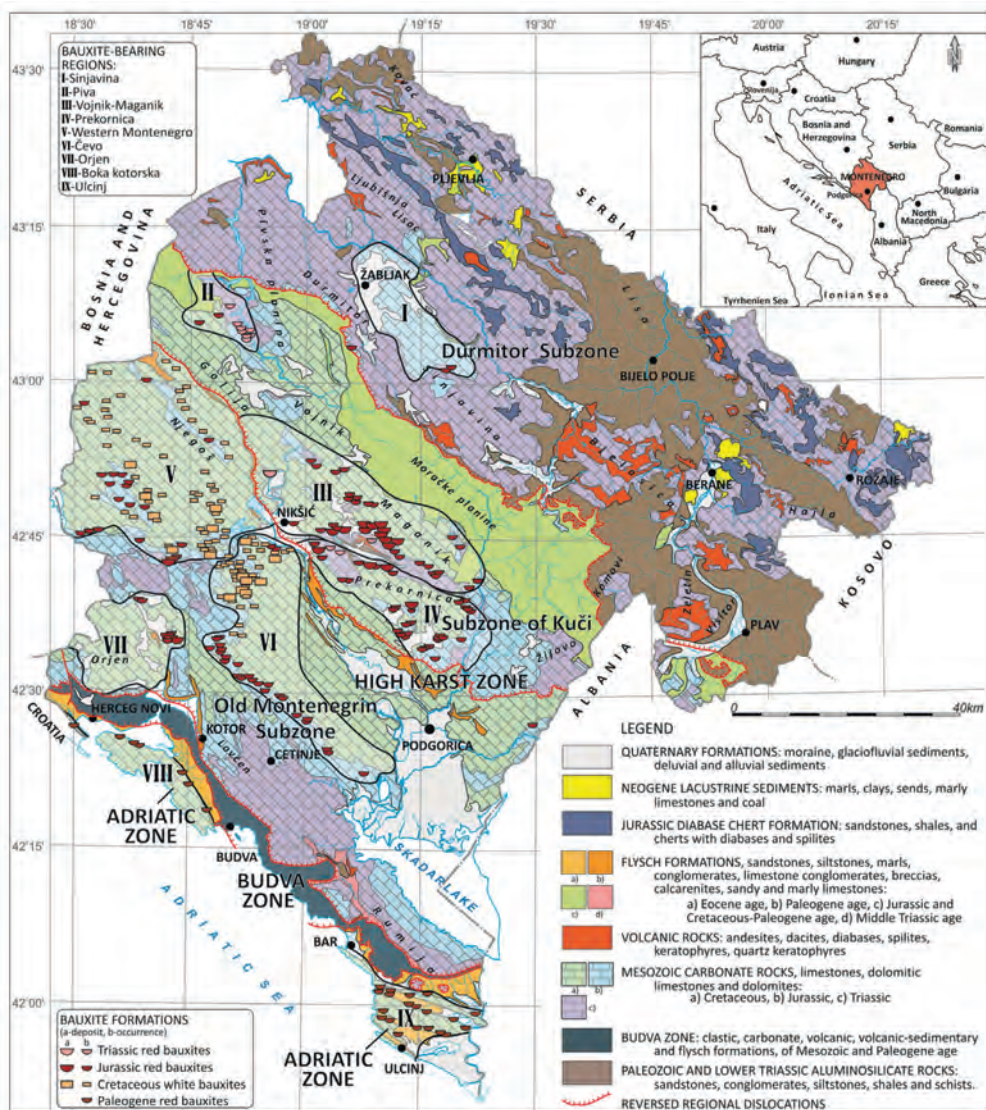


Fig. 2 - Carta geologica semplificata del Montenegro (RADUSINOVIĆ, S., PAPADOPOULOS, A.M., 2021)..

clude rocce devoniano-carbonifere, sedimenti flysch del Carbonifero e depositi clastici permiani, tipici dell'unità sovrainposta di tipo esterno.

- **Budva-Cukali (zona costiera):** dominata da sedimenti pelagici mesozoici, sormontati da depositi sinorogenici paleogenici. La loro messa in posto avviene sopra la Kruja-Dalmazia dal tardo Eocene al Miocene medio.
- **Basamento cristallino paleozoico:** scarsamente affiorante e quindi poco accessibile, costituisce il substrato profondo delle principali unità strutturali.
- **Successioni cenozoiche:** ben rappresentate dai calcari a foraminiferi paleogenici (Thanetiano - Cuisiano), associati ai depositi flysch torbiditici tra Eocene medio e Miocene medio.

Dinamica strutturale e paleogeografia

La struttura attuale mostra pieghe di sollevamento terziario parallele alla costa, con grandi anticlinali e thrust sovrascorrenti, piegati e rovesciati verso il mare. Il quadro stratigrafico presenta una prevalenza di calcari batiali e neritici nelle zone più esterne e materiali clastici grossolani, flysch e marne verso l'entroterra, segno dell'antica geosinclinale dinarica. (RADU-SINOVIĆ, S., PAJOVIĆ, M., 2024)

INQUADRAMENTO CLIMATICO DI KUČKE PLANINE

L'altopiano di Kučke Planine costituisce un sistema montuoso caratterizzato da condizioni climatiche tipiche delle aree carsiche di alta montagna delle Alpi Dinariche. Questa zona montuosa, che si estende come parte del complesso sistema dei Prokletije, presenta un **clima alpino con marcate variazioni stagionali** e caratteristiche peculiari legate all'elevata altitudine e alla morfologia carsica. (ČULAFIĆ, G., KRSTAJIĆ, J., 2024).

REGIME TERMICO

Durante la stagione invernale, che si estende da novembre ad aprile, le **temperature massime oscillano tra -6°C e 8°C**. Le temperature minime possono raggiungere **valori estremamente rigidi, anche inferiori a -18°C nelle zone più elevate o non esposte alla radiazione solare**. Il mese più freddo è generalmente gennaio, con temperature medie che si mantengono costantemente sotto lo zero.

La stagione estiva, relativamente breve, presenta **temperature massime a 1800m s.l.m. Mediamente comprese tra 21°C e 26°C** nei mesi di luglio e agosto. Le **temperature notturne rimangono fresche, oscillando tra 11°C e 15°C**, caratteristica tipica dei climi di alta montagna. Questa marcata escursione termica diurna è amplificata in condizioni di cielo sereno, tipiche dei mesi estivi.

REGIME PLUVIOMETRICO

Le **precipitazioni annuali in Kučke Planine sono abbondanti**, con valori che mediamente si attestano attorno ai 1800mm, ma possono arrivare fino a **2500 mm annui**. Il regime pluviometrico presenta una **distribuzione stagionale caratteristica** delle aree montane mediterranee:

- **Inverno:** Le precipitazioni raggiungono i valori massimi tra dicembre e febbraio, con quantitativi mensili che possono superare i 180-190 mm
- **Primavera:** Si registra una graduale diminuzione delle precipitazioni, con valori tra 110-140 mm mensili
- **Estate:** Rappresenta la stagione più secca, con precipitazioni minime nei mesi di luglio-agosto (60-80 mm)
- **Autunno:** Le precipitazioni aumentano progressivamente, raggiungendo 150-170 mm nei mesi di ottobre-novembre

REGIME NIVALE

Il **regime nivale costituisce un elemento fondamentale** del clima di Kučke Planine. La neve è presente per **4-6 mesi all'anno**, tipicamente tra novembre e aprile, con possibili precipitazioni nevose anche a maggio e ottobre alle quote più elevate. Lo **spessore del manto nevoso può raggiungere i 3-5 metri** nelle aree di accumulo e nelle depressioni carsiche, similmente a quanto osservato nel vicino massiccio del Durmitor.

CARATTERISTICHE MICROCLIMATICHE

La **morfologia carsica** di Kučke Planine genera specifiche **condizioni microclimatiche** che differiscono notevolmente dalle aree circostanti. Le numerose **depressioni carsiche** fungono da **zone di accumulo dell'aria fredda**, creando inversioni termiche locali che possono determinare differenze di temperatura di diversi gradi rispetto alle aree circostanti alla stessa quota.

Le **pareti rocciose calcaree esposte** e i **campi solcati (karren)** che caratterizzano il paesaggio superficiale presentano **forti escursioni termiche diurne**, con temperature che possono avvicinarsi ai 30°C a 2000m di altitudine nelle ore centrali delle giornate estive soleggiate, per poi scendere rapidamente durante le ore serali e notturne. Questo fenomeno è particolarmente accentuato a causa della diffusa assenza di copertura vegetale e dà origine a fenomeni di **degradazione termoclastica**.

INFLUENZA SUI PROCESSI CARSI

Le **condizioni climatiche di Kučke Planine** esercitano un **controllo fondamentale sui processi di carsificazione**. L'abbondanza delle precipitazioni, concentrata principalmente nei mesi autunno-invernali, garantisce un apporto idrico significativo per i processi di dissoluzione chimica delle rocce carbonatiche. L'**alternanza di cicli di gelo-disgelo**, particolarmente frequenti durante i mesi di transizione stagionale, accelera i processi di **fratturazione meccanica** delle rocce calcaree, aumentando la superficie di contatto tra l'acqua e la roccia e favorendo quindi l'intensificazione dei processi di dissoluzione.

La **permanenza prolungata della copertura nevosa** ha importanti implicazioni per i processi carsici, in quanto l'acqua di fusione nivale, caratterizzata da temperature prossime a 0°C e da un alto contenuto di anidride carbonica disciolta, rappresenta uno dei principali agenti di dissoluzione delle rocce carbonatiche del massiccio. Inoltre, durante i cicli di gelo-disgelo, particolarmente intensi in primavera e autunno, si verifica un'accelerazione dei processi di **crioclastismo** che contribuisce alla modellazione del paesaggio carsico.



Fig. 3 - L'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).

LA GEOLOGIA DI KUČKE PLANINE

Posizione Tettonica e Inquadramento Strutturale

Kučke Planine si inserisce nel complesso sistema orogenetico delle Dinaridi, rappresentando un settore della zona tettonica denominato **Unità Tettonica di Kuči**. A differenza delle tipiche strutture dinariche con orientamento NW-SE, **l'area esaminata presenta una disposizione caotica dei rilievi che si estendono in tutte le direzioni**, in quanto è possibile che le deformazioni estensionali di tipo egeo (BIERMANN et al., 2022) si sovrappongano alle strutture compressive dinariche principali. Questa caratteristica distintiva deriverebbe dalla posizione di transizione tra le Dinaridi propriamente dette e il sistema delle Prokletije, conferendo alla regione una complessità strutturale peculiare.

QUADRO STRATIGRAFICO REGIONALE

La stratigrafia della zona di Kučke Planine riflette la complessa evoluzione geodinamica delle Alpi Dinariche, caratterizzata da una successione di eventi che spaziano dal Paleozoico al Cenozoico. Quest'area comprende unità stratigrafiche appartenenti a diversi domini paleogeografici del margine orientale della microplacca adriatica e rappresenta una sezione chiave per comprendere l'evoluzione mesozoica e cenozoica della regione dinarica.

L'area è caratterizzata da **estese formazioni calcaree mesozoiche** che rappresentano il substrato dominante dell'altopiano carsico. Le formazioni carbonatiche, prevalentemente costituite da calcari e dolomie del Triassico, Giurassico e Cretacico, formano la base strutturale su cui si sono sviluppati i sistemi carsici e speleologici della regione.

Basamento Triassico

Le formazioni triassiche dell'area sono caratterizzate da successioni carbonatiche di piattaforma che costituiscono il basamento principale del massiccio, caratterizzati da strati di notevole potenza che testimoniano un ambiente di piattaforma carbonatica marina (**Piattaforma Carbonatica Adriatica, AdCP**). Queste formazioni presentano un'intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi glacio-carsici.

Successioni Giurassiche

Le formazioni giurassiche sovrastanti integrano la successione carbonatica triassica con banconi calcarei di potenza metrica, ben evidenti dalle foto aeree del territorio e dalle ricognizioni effettuate sul terreno. L'alternanza di calcari massivi e livelli più stratificati riflette le variazioni del livello del mare durante il Giurassico.

Successioni Carbonatiche Cretaciche

Le formazioni cretatiche dell'area sono caratterizzate da calcari di piattaforma carbonatica che rappresentano la continuazione dell'evoluzione della Piattaforma Carbonatica Adriatica.

Depositi quaternari

I periodi glaciali pleistocenici hanno caratterizzato l'evoluzione morfologica recente dell'area. Inoltre, le caratteristiche del rilievo glaciale pleistocenico si sono conservate grazie alla struttura geologica favorevole (PETROVIC A., 2014).

Tipi di depositi quaternari presenti

- **Morene glaciali:** morene laterali e terminali, costituite da materiale eterogeneo non stratificato, spesso di composizione carbonatica (ciottoli, blocchi di varia dimensione).
- **Depositi di till:** materiali mal classificati prevalentemente sabbioso-limosi con inclusi di rocce carbonatiche subangolari o arrotondate, tipici delle zone moreniche.

- **Sedimenti periglaciali e fluvioglaciali:** presenti in aree di drenaggio e depressioni, costituiti da materiali più fini (sabbie, argille, limo) derivanti dall'azione delle acque di fusione glaciale.
- **Depositi di copertura regolata dal carsismo:** nei settori carsici sono possibili accumuli di terra rossa e residui alterativi, generati dal disfacimento chimico delle rocce carbonatiche nel contesto post-glaciale.

Potenziale carsico ipogeo

Secondo la carta geologica dell'*Istituto per la ricerca geologica della SRCG (Yugoslavia, 1958-1968)*, la zona è caratterizzata da calcari, calcari dolomitici e dolomia del Triassico superiore, che a nord-est sono in contatto tettonico con il Flysch e la breccia calcarea del Durmitor.

Interpretando le sezioni geologiche si rileva che il potenziale carsico ipogeo delle formazioni carbonatiche potrebbe arrivare fin oltre i 1200 metri, come testimoniato dalla Opasna Jama, unica grotta verticale conosciuta nell'area (profonda più di 600 metri) e posta a quote molto inferiori (1300m s.l.m. e più a sud rispetto all'altopiano esplorato).



Fig. 4 - Carta geologica dell'area indagata (nel cerchio rosso).

GEOMORFOLOGIA E PAESAGGIO CARSICO

L'altopiano di Kučke Planine è sistema geomorfologico complesso dove la tettonica alpina, i processi glaciali quaternari e il carsismo hanno interagito per produrre uno dei paesaggi carsici di alta montagna più significativi delle Alpi Dinariche meridionali.

Situato tra 1800 e 2000 metri di altitudine, la morfologia dell'altopiano può dare una falsa impressione dell'altitudine reale delle vette, poiché i rilievi emergono da un plateau già elevato di circa 1500-1800 metri: la vetta più elevata, il Surdup, raggiunge i 2184 metri, mentre altre quindici sommità superano i 2000 metri.

Morfologia glaciocarsica nel Kučke Planine

La morfologia epigea di Kučke Planine rivela un complesso sistema di processi glaciali e periglaciali che ha plasmato profondamente il paesaggio carsico durante il Quaternario. L'interazione tra processi glaciali e carsici ha prodotto forme uniche di glaciocarsismo, mentre l'attuale presenza di grotte con depositi di ghiaccio e neve testimonia la continuità temporale dei processi crionivali nella regione, seppur molto attenuati rispetto al passato. La fase gla-



Fig. 5 - L'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).

ciale più antica e più estesa è attribuita al MIS 12 (470-420 ka), durante il quale si formarono estese calotte glaciali che ricoprirono gran parte dell'area centrale del Montenegro. Questo rappresenta l'evento glaciale più significativo dell'intera storia pleistocenica della regione, con evidenze di morene terminali conservate a quote relativamente basse. (ŽEBRE et al., 2013; BAROVIĆ et al., 2023).

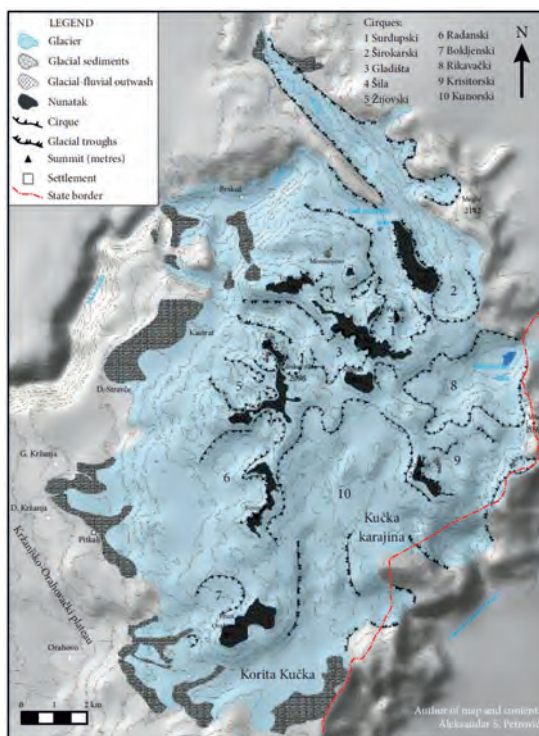


Fig. 6 - Rappresentazione dell'estensione dei ghiacci e delle morfologie durante il Massimo Glaciale Pleistocenico (PETROVIC A., 2014).

Ricostruzione del Massimo Glaciale Pleistocenico

Gli studi geomorfologici dettagliati hanno permesso di ricostruire l'estensione del massimo glaciale pleistocenico in Kučke Planine.

Durante questa fase, caratterizzata da un ghiacciaio unico esteso su tutta l'area del massiccio, la superficie glacializzata raggiunse circa 180 km².

Il rilievo pre-glaciale impedì la formazione di una tipica calotta glaciale, determinando invece lo sviluppo di ghiacciai interconnessi (icefields).

I **nunatak**² presenti nell'area sono la prova diretta che la copertura di ghiaccio, sebbene estesa, non era abbastanza spessa da sommergere l'intera catena montuosa. Questo ha permesso di escludere la presenza di una calotta glaciale (*ice cap*) completa e uniforme.

Questo ha prodotto un sistema glaciale complesso caratterizzato da un ghiacciaio di transection (o di transfluenza) nelle parti centrali e nord-occidentali, dove il ghiaccio fluiva attraverso le valli, e un **ghiacciaio di tipo icefield** nella parte orientale. (Petrovic A., 2014)

Forme glaciali

Le forme erosive glaciali in Kučke Planine mostrano una chiara impronta dell'interazione tra processi glaciali e substrato calcareo. I circhi glaciali, le valli glaciali e le forme di erosione subglaciale testimoniano l'intensità dei processi erosivi durante le fasi glaciali principali. L'erosione glaciale ha modellato profondamente il paesaggio calcareo, creando ampie valli a U che contrastano nettamente con le strette gole carsiche caratteristiche dei settori non glacializzati.

Forme periglaciali

L'attività periglaciale ha seguito un pattern simile a quello glaciale, espandendosi verso valle durante le glaciazioni e spostandosi verso quote più elevate durante i periodi interglaciali. Attualmente, i processi periglaciali nelle montagne mediterranee sono principalmente legati al gelo stagionale, ma gli ambienti interessati da condizioni di permafrost nel passato erano significativamente più estesi.

Interazione tra Processi Glaciali e Carsici

L'interazione tra processi glaciali e carsici in Kučke Planine è stata fortemente influenzata dall'accumulo di enormi quantità di acqua in alta quota durante le fasi glaciali. Durante i periodi interglaciali, la fusione ha prodotto notevoli flussi, probabilmente responsabili di una speleogenesi molto intensa e di una carsificazione profonda.



Fig. 7 - Blocchi di ghiaccio a -160m nella Grotta Prepih (foto Ida Cossetтини).

² I nunatak (in lingua inuit: picco isolato) sono picchi rocciosi che emergono dalla superficie dei ghiacciai.

Nelle condizioni odierne, l'area è esposta a intensi processi glaciocarsici. Fattori molto importanti nell'attuale fase di sviluppo delle grotte sono le acque di fusione derivate dallo scioglimento stagionale del manto nevoso in superficie, così come la neve e il ghiaccio accumulati all'ingresso delle grotte. In numerose cavità sono stati osservati spessi depositi di neve, firn e ghiaccio che con tutta probabilità, nel periodo invernale potrebbero raggiungere anche i 10 m di spessore.

CARSISMO EPIGEO

L'area di Kučke Planine rappresenta un esempio significativo di carsismo epigeo di alta montagna nell'area dinarica. Questo massiccio carbonatico costituisce un laboratorio naturale ideale per l'osservazione e lo studio dei fenomeni carsici superficiali che si sviluppano in ambiente montano, dove i processi di dissoluzione chimica delle rocce carbonatiche interagiscono con gli agenti morfogenetici tipici dell'alta quota.

DEGRADAZIONE

Denudazione carsica

Oltre agli effetti erosivi dei ghiacciai, va sempre considerata la **denudazione carsica** il cui effetto è il progressivo **abbassamento della superficie** con la contestuale demolizione di tutte le cavità che vengono intercettate.

Come ordine di grandezza, numerosi studi eseguiti dall'Università di Trieste attribuiscono a questo fenomeno tassi medi di abbassamento della superficie topografica che variano tra 20-40 mm/ka. Va anche considerato che in una zona di tipo alpino, le temperature medie piuttosto basse favoriscono l'aggressività dell'acqua e quindi possono contribuire positivamente alla corrosione della compagine calcarea, che quindi potrebbe avere tassi di denudazione ancora superiori.

Weathering

Il crioclastismo rappresenta il processo di disaggregazione meccanica delle rocce causato dalla pressione esercitata dall'aumento di volume dell'acqua durante la fase di congelamento all'interno delle fessure rocciose. Questo fenomeno è particolarmente attivo negli ambienti alpini dei Kučke Planine, dove le condizioni climatiche favoriscono frequenti cicli di gelo-disgelo, soprattutto durante i periodi di transizione stagionale.

In Kučke Planine sono attivi anche fenomeni secondari di termoclastismo, un processo di degradazione delle rocce causato dalle ripetute dilatazioni e contrazioni che la porzione superficiale di una roccia subisce durante i cicli di riscaldamento e raffreddamento. Questo fenomeno assume particolare rilevanza durante il periodo estivo, quando le differenze di temperatura tra la roccia irraggiata dalla luce solare e la temperatura notturna raggiungono valori elevati, creando significativi gradienti termici all'interno del materiale roccioso.

Influenza tettonico/strutturale

Le dinaridi sono una catena montuosa ancora soggetta a sollevamento tettonico che genera stress dando origine a un'intensa fratturazione della roccia, rilevabile sia dalle foto aeree che sul campo; si creano, quindi, condizioni ideali per i processi geomorfologici di degradazione della roccia sopra descritti.

MICROFORME CARSICHE

Le **microforme di dissoluzione** sono estremamente diffuse su tutto l'altopiano e spesso notevolmente evolute.



Fig. 8 - L'ingresso dell'abisso Ledo ripreso dal drone (foto Alberto Giorgi).

Le più diffuse sono:

- **Campi solcati (Karren, o campi carreggiati)**
- **Scannellature (Rillenkarrren)**
- **Solchi carsici (Rinnenkarren e Kluftkarren)**
- **Solchi a meandro**
- **Fori carsici**
- **Crepacci**

Vale la pena citare le **vaschette di corrosione (kamenitza)**, che sono praticamente assenti (ne sono state segnalate solo due), probabilmente a causa della loro particolarità genetica e cioè alla macerazione del materiale organico vegetale (che su questo altopiano è quasi assente) in acqua con la sua conseguente acidificazione.



Fig. 9 - Una delle rare kamenitza dell'altopiano di Kučke Planine (foto Alberto Giorgi).



Fig. 10 - Esteso karren a circa 1850m s.l.m. (foto Alberto Giorgi).

MACROFORME CARSICHE

La macro-morfologia carsica dell'altopiano di Kučke Planine è dominata da ampie distese di karren e da bassi rilievi separati da selle, avvallamenti e doline, con circolazione idrica superficiale assente; questo assetto è tipico del *Dinaric Karst* ed è il risultato congiunto di strutture tettoniche, eredità glaciali, glaciocarsismo recente e dissoluzione carsica. Allo stato attuale non risultano studi specifici e pubblicati sul sistema idrogeologico e sull'acquifero di Kučke Planine, per cui la caratterizzazione idrogeologica di dettaglio rimane lacunosa e va inferita dal contesto regionale dinarico.



Fig. 11 - Superficie ad avvallamenti e dossi a 1900m s.l.m. (foto Alberto Giorgi).

CARSISMO IPOGEO

Durante le cinque spedizioni speleologiche effettuate sull'altipiano di Kučke Planine, la Commissione Grotte Eugenio Boegan ha esplorato e rilevato 41 cavità. È quindi possibile avanzare un'ipotesi sulle fasi speleogenetiche che hanno interessato l'altipiano, correlando i dati speleologici alle osservazioni effettuate all'esterno, alla litologia, ai dati strutturali e alla ricostruzione paleoclimatica quaternaria presente in letteratura.

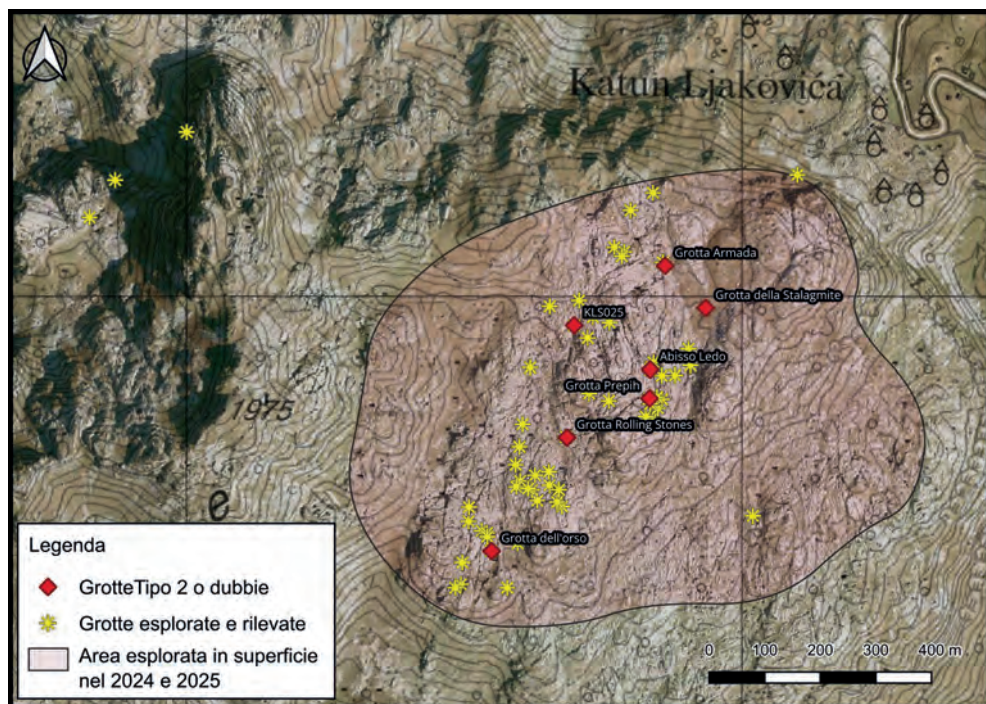


Fig. 12 - Le grotte esplorate e rilevate dalle spedizioni CGEB 2024-2025.

IPOTESI SPELEOGENETICHE

Le evidenze raccolte durante le spedizioni sull'altopiano di Kučke Planine permettono la classificazione delle cavità esplorate in **due principali gruppi morfogenetici**, con alcune di esse a probabile evoluzione mista.

Impatto della glaciazione sulla speleogenesi

Contrariamente a quanto sostenuto da alcune teorie, le recenti datazioni (U/Th, paleomagnetismo) eseguite in altre zone simili hanno dimostrato che molte grotte profonde di montagna sono più antiche delle glaciazioni. Il ruolo dei ghiacciai sembra limitato principalmente all'approfondimento delle valli e al riempimento con sedimenti nei condotti durante i periodi glaciali. (AUDRA, 1994, 2004; BINI 1994; HÄUSELMANN 2002). Durante i periodi interglaciali, le condizioni climatiche più miti favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale e di suoli maturi sulla superficie carsica. Questa biomassa, attraverso la respirazione delle radici e la decomposizione della materia organica, arricchisce notevolmente l'acqua di infiltrazione con anidride carbonica (CO₂). Di conseguenza, l'acqua acquisisce una maggiore acidità iniziale, potenziando la sua capacità di dissolvere la roccia calcarea e quindi di favorire la formazione di fenomeni epigenetici (AUDRA 2004).



Fig. 13 - Cascate di ghiaccio nella grotta Prepilh (foto Veronika Paulina).

Importanza dell'epicarso

I processi carsici sotterranei non si limitano alla genesi dei grandi sistemi ipogei, spettacolari ma remoti e spesso di difficile accesso.

L'**epicarso** rappresenta la fascia superficiale della roccia carbonatica, caratterizzata da elevata alterazione fisico-chimica e, nel caso di Kučke Planine, un'elevata frequenza di discontinuità strutturali quali fratture e faglie; in quest'area si concentra un'efficace raccolta e infiltrazione delle acque meteoriche e di fusione nivale/glaciale, e quindi rappresenta la sede più evidente e osservabile del carsismo.

L'epicarso, zona intensamente fratturata per decompressione dell'ammasso roccioso e processi morfogenetici, presenta una porosità e permeabilità secondarie marcatamente superiori rispetto alla roccia sottostante. Questo incremento di permeabilità è dovuto principalmente all'allargamento delle fessure per azione dell'acqua acidificata dal CO_2 prodotto nel suolo e dalla zona radicale della vegetazione. La porosità e la permeabilità diminuiscono progressivamente con la profondità, man mano che si riduce l'effetto dell'alterazione superficiale e le fratture si restringono.

Questa zona superficiale può fungere da serbatoio temporaneo di acqua, trattenendo e rallentando le acque di percolazione prima che esse raggiungano la zona di trasmissione inferiore, nonché saturandole di carbonato abbassando, quindi, la loro capacità corrosiva.

Sull'altopiano indagato, oltre alle morfologie epigee classiche, l'epicarso ospita un insieme di cavità superficiali e forme ipogee minori che non sono direttamente connesse ai sistemi profondi di drenaggio, quantomeno non attraverso passaggi percorribili dagli speleologi. Di norma, infatti, nei sistemi ipogei montani, la percentuale di ingressi superficiali che permettono l'accesso a sistemi sotterranei estesi e profondi è molto bassa rispetto al numero totale degli ingressi rilevati.

Queste cavità si originano soprattutto in condizioni di flusso idrico laminare o poco turbolento, dalla percolazione e, talvolta, anche in seguito a fenomeni locali di condensazione. Studi di riferimento (KLIMCHOUK, 1995) descrivono dettagliatamente le fasi evolutive morfologiche dell'epicarso, attribuendo un ruolo centrale alla dinamica delle discontinuità e alla concentrazione del flusso percolante nella formazione di doline e pozzi di dissoluzione.

Tuttavia, l'epicarso riveste una significativa importanza speleologica in quanto la caratterizzazione morfologica delle cavità superficiali permette di **formulare un protocollo esplo-**

rativo per la localizzazione dei potenziali ingressi ai sistemi profondi, risultando fondamentale anche per la pianificazione di future campagne esplorative. Infatti, essere in grado di riconoscere un pozzo di percolazione epigeo dall'ingresso a una cavità di origine freatica che la denudazione carsica ha portato alla luce può rendere più efficienti le future campagne esplorative speleologiche, che normalmente sono tese al ritrovamento di accessi a sistemi profondi.



Fig. 14 - L'epicarso di Kučke Planine (foto Cristiano Toffoletti).

LE DUE TIPOLOGIE DI GROTTA DELL’ALTIPIANO DI KUČKE PLANINE

L’integrazione fra le osservazioni geomorfologiche in superficie, quelle ipogee, i dati geografici e le analisi delle foto aeree e da drone, consente di classificare le grotte esplorate sull’altipiano di Kučke Planine in **due tipi principali**, secondo un **criterio morfogenetico** riassunto nella tabella sottostante.

TABELLA COMPARATIVA

Aspetto	Tipo 1	Tipo 2
Controllo strutturale	Controllate da discontinuità verticali	Controllate anche da discontinuità inclinate o sub-orizzontali
Geometria	Pozzi semplici, rare anastomosi locali	Sequenze di pozzi e vani, tratti sub-orizzontali, condotte freatiche relitto
Profondità tipica	5–30 m	Da 10m fino a 160 m
Depositi	Detrito grossolano, massi di crollo, firn	Detrito mal classato, ghiaccio, argille residuali
Speleotemi	Assenti	Presenti in stato vestigiale o comunque deteriorato
Tracce di flusso idrico incanalato	Assenti	Scallops, meandri, evorsioni, risultati di eventi paragenetici
Microclima	Cold-trap locale, firn	Ghiaccio ipogeo esteso, stratificazione termica, temperature molto basse (1.7°C a -120m)

GROTTA TIPO 1: CAVITÀ DI DEGRADAZIONE EPIGEA

Questa tipologia, composta da **34 cavità tra le 41 esplorate e mappate**, è caratterizzata da morfologie riconducibili a processi di weathering e carsismo epigeo di epoca quaternaria, prevalentemente interglaciale, con evoluzione attiva in epoca recente.

Le grotte di questa categoria manifestano le seguenti caratteristiche morfologiche:

- Pozzi di percolazione sviluppati lungo discontinuità sub-verticali della roccia, quindi totalmente controllati dalla struttura e con ampio accesso diretto dalla superficie.
- Profondità variabile, prevalentemente tra 5 e 30 metri, coerente con l'influenza del controllo strutturale locale. forma a fuso
- Fondo costituito da detrito di crollo mal classato, con frazioni granulometriche superiori alle ghiaie, spesso di dimensioni decimetriche o più; scarsa presenza della frazione più sottile o del till glaciale.
- La maggior parte delle cavità di questo tipo risulta isolata, ma alcune presentano fenomeni di anastomosi per coalescenza di due o più pozzi contigui e paralleli.
- Assenza di vani sub-orizzontali e di evidenze di flusso idrico incanalato.
- Nei pozzi più profondi si osservano depositi di firn, in accordo con la persistenza di condizioni microclimatiche glaciali o periglaciali.
- Le pareti risultano generalmente instabili, in condizioni molto lontane dall'equilibrio strutturale.

In sintesi, le grotte di Tipo 1 suggeriscono prevalenti condizioni periglaciali recenti, crolli gravitativi, glaciocarsismo, termoclastismo e intrappolamento del freddo con firn o raro ghiaccio pluriennale.

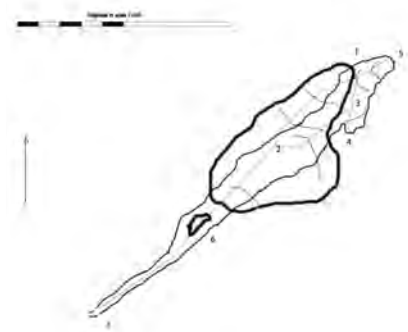
A titolo d'esempio, si illustrano di seguito le caratteristiche di due grotte di tipo 1 rappresentative di tutto il gruppo.

Grotta KLS005 (Tipo 1)



Sviluppo spaziale: 25 m

Profondità: 8 m

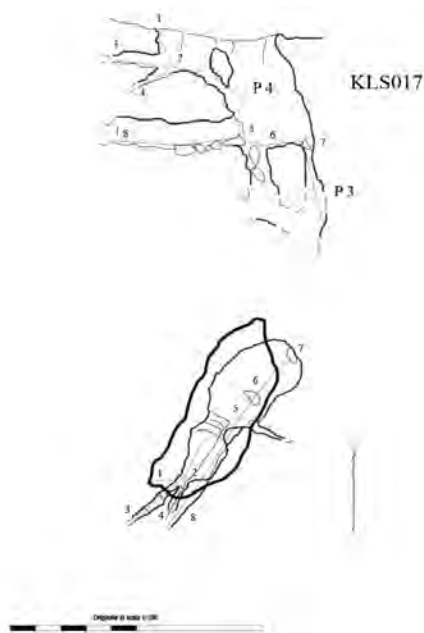


Ampio ingresso di m 4 x 6 Impostato su una frattura sub-verticale con direzione NE-SW. Scendendo, l'ingresso rastrema per trasformarsi in una diaclasi allargata il cui fondo inclinato è ingombro di massi e ciotoli di crollo. È evidente che l'imboccatura in superficie, più soggetta agli agenti atmosferici, risulta più di dimensioni maggiori rispetto al fondo della cavità.

Rilievo: Umberto Mikolic

Umberto Mikolic 10-08-2024

Grotta KLS0017 (Tipo 1)



Umberto Mikolic - Aldo Fedel - Veronika Paulina 16-08-2024

Sviluppo spaziale: 22 m

Profondità: 8 m

La cavità è impostata su una discontinuità sub-verticale con direzione NE-SW.

Il fondo è occluso da enormi massi. Tra di essi s'apre un ulteriore pozzo di almeno 4 metri.

Rilievo: Umberto Mikolic/Aldo Fedel/Veronika Paulina

GROTTA TIPO 2: CAVITÀ PREQUATERNARIE

Queste cavità, più profonde e complesse, rappresentano sistemi relitti di **probabile speleogenesi pre-quaternaria** impostati in regime freatico/epifreatico, rimodellati da fasi stadiali e interstadiali quaternarie e portati alla luce dalla denudazione carsica. Sono di particolare interesse per la ricostruzione paleogeografica e speleogenetica dell'altipiano.

Indicatori principali:

- Architettura articolata, con sviluppo di sequenze di pozzi e vani collegati che suggeriscono una lunga storia evolutiva e fasi multiple di rimodellamento.
- Ingressi talora sub-orizzontali o a caverna, indicativi di una genesi antica in regime freatico o di scorrimento idrico incanalato.
- Profondità generalmente superiori rispetto al gruppo 1 (attualmente è stato raggiunto un massimo di 160 metri di profondità).
- Presenza di detriti di crollo e con una componente importante di accumuli di ghiaccio.
- Presenza di forme tipiche di un flusso idrico, che testimoniano una persistente attività di trasporto e rimodellamento dovuta allo scorrimento sotterraneo incanalato (scallops, meandri, condotte freatiche).
- Evidenze di una lunga storia evolutiva: vestigia di speleotemi, micro-forme paragenetiche e livelli di argille residuali rosse.

Implicazioni paleoclimatiche

Le grotte di Tipo 2 conservano archivi paleoclimatici: ghiacci ipogei stratificati, speleotemi relitti e sedimenti fini che possono registrare sequenze climatiche e idrologiche pre-quaternarie, e che se indagate si possono dimostrare particolarmente importanti ai fini della ricostruzione paleoclimatica e della dinamica carsica dell'altipiano.

Grotta Armada (Tipo 2)

Quota ingresso: 1862 m	Sviluppo: 68 m	Profondità: 34 m
------------------------	----------------	------------------

L'ingresso della grotta si trova a 1850 metri di altitudine ed è facilmente accessibile; l'accesso conduce a un vano principale dove sono stati osservati numerosi elementi morfologici e sedimentari di notevole interesse. Successivamente, attraverso un passaggio verticale si accede a un pozzo che termina in un vano ingombro di massi di frana; anche qui si osservano ulteriori morfologie di scorrimento idrico.

Caratteristiche interne della grotta

- Ampia colata calcitica in situ, fortemente alterata dagli agenti atmosferici: testimonia fasi di deposizione chimica seguite da esposizione agli agenti atmosferici e successiva degradazione.
- Porzione di soffitto con pendenti, in roccia indicativi di una fase vadosa antica durante la quale i sedimenti si accumularono fino alla quota di volta, costringendo l'acqua a corrodere la roccia in modo anti-gravitativo e generando forme coniche per anastomosi dei canali di volta.
- Numerosi segni di evorsione, morfologie di origine idrodinamica prodotte da vortici dello scorrimento idrico, anche con carico solido, confermano il ruolo delle acque incanalate nella genesi della cavità.
- Evidenti effetti di dislocazione sulle pareti e su soffitto, probabilmente attribuibili a tettonica recente o comunque post-speleogenetica interessano le succitate forme.

Interpretazione genetica e paleogeografica

Il complesso morfologico della cavità, la successione delle forme idrodinamiche e le evidenze tettoniche recenti suggeriscono un'origine risalente al Miocene o al Pliocene, coerente con la speleogenesi di numerose altre aree dinariche. In quei periodi, l'altopiano doveva presentare assetti geomorfologici, idrografici e climatici profondamente diversi da quelli attuali; tali condizioni dovettero favorire la formazione di condotti freatici e successivamente una circolazione idrica di tipo vadoso, oggi testimoniata dalle forme relitte all'interno della grotta.



Fig. 15 Pendenti e tracce di neotettonica alla grotta Armada (foto Alberto Giorgi).

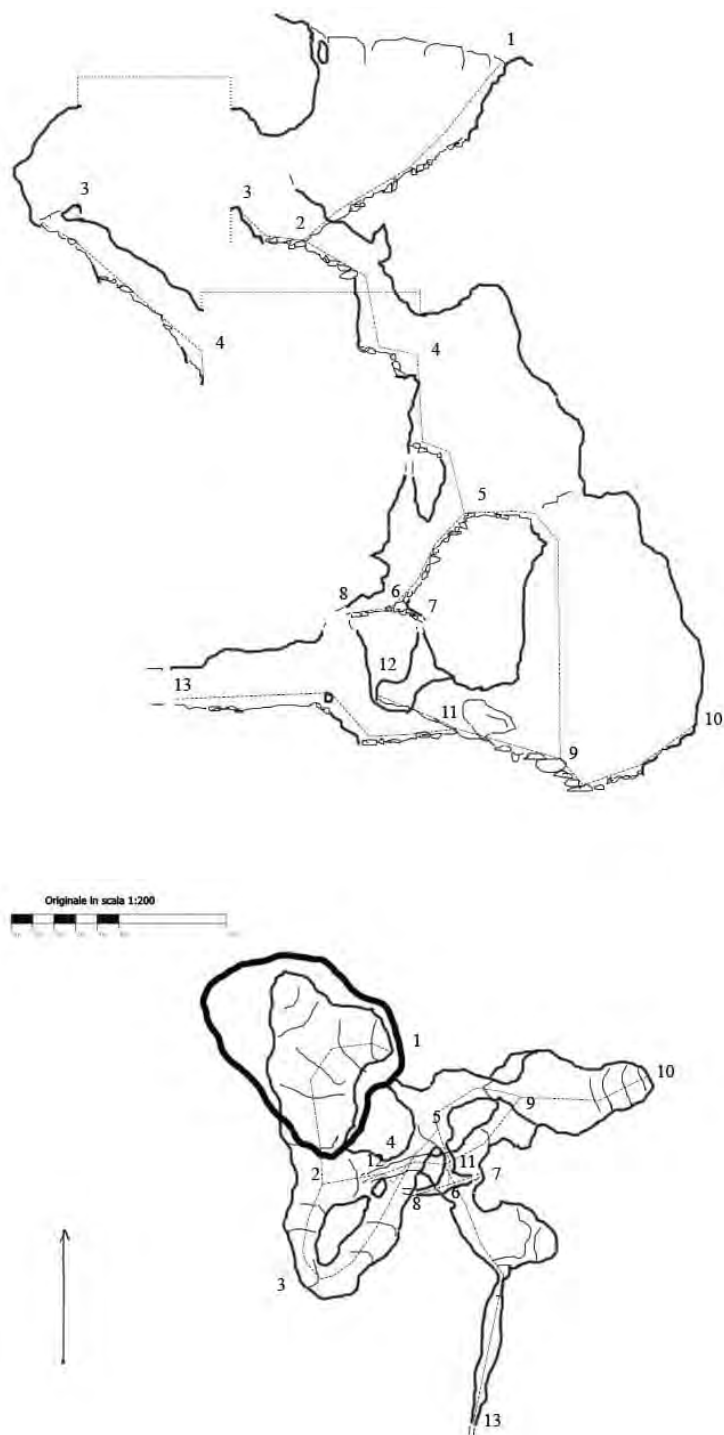


Fig. 16 - Rilievo topografico della grotta Armada (rilievo di Umberto Mikolic).



Fig. 17 - Colata calcitica degradata (foto Alberto Giorgi).



Fig. 18 - Fenomeni di dislocazione neotettonica (foto Alberto Giorgi).

Grotta Prepih (Tipo 2)

Quota ingresso: 1849 m	Sviluppo: 279 m	Profondità: 160 m
------------------------	-----------------	-------------------

La grotta Prepih (ingresso a 1850 metri di altitudine) si sviluppa con una sequenza di pozzi e brevi gallerie inclinate, raggiungendo una profondità di 160 metri. L'ingresso si presenta come una voragine verticale di circa 15 metri di profondità dalla geometria irregolare.

Evidenze geomorfologiche

La grotta è soggetta a intensi fenomeni carsici e glaciocarsici che ne hanno rimodellato profondamente le forme originali: gran parte delle forme dovute allo scorrimento idrico sono state asportate o modificate dall'azione del ghiaccio combinata allo scorrimento dell'acqua di fusione e a un'intensa fratturazione della roccia calcarea. Questa condizione è tipica delle grotte d'alta quota, dove le fasi glaciali e interglaciali hanno alterato e demolito le forme primarie e operato cicli di sedimentazione/asportazione, sia fisici che chimici, favorendo una complessa ridefinizione morfologica dell'ambiente.

Inoltre, durante l'ultima esplorazione della grotta Prepih, a circa 40 metri di profondità, è stata rilevata una perdita notevole di spessore del ghiaccio ipogeo (stimata fino a 1m) avvenuta tra il 2024 e il 2025.

Caratteristiche morfologiche significative

- Pendenti in roccia sul soffitto di una galleria inclinata: queste forme testimoniano una fase paragenetica, probabilmente di età tardo pliocenica o pleistocenica inferiore, durante la quale la grotta fu quasi interamente riempita di sedimenti. L'acqua, costretta a scorrere lungo il tetto, ha prodotto canali di volta e successivi pendenti per processi di anastomosi e scavo anti-gravitativo.
- Presenza di un meandro sinuoso che collega due pozzi sub-verticali: questa forma è un residuo idrodinamico, indicativo di un'evoluzione in ambiente epifreatico o vadoso.
- I pavimenti dei vani sono quasi completamente ricoperti da uno spesso strato di ghiaccio molto compatto e da detrito di crollo, dimostrando la combinazione di fenomeni carsici e glaciocarsici. Sulle pareti si segnalano numerose cascate di ghiaccio in corrispondenza di camini.
- La roccia è interessata da processi di degradazione intensi, favoriti dalla sua elevata fratturazione.
- Sono assenti gli speleotemi, tranne che nel secondo pozzo d'ingresso della cavità (ingresso alto), dove si osservano vestigia di una copertura calcitica.

Significato paleogeografico

La presenza di residui di deposizione calcitica, pendenti e meandri, seppur parzialmente rimodellati, suggerisce che la cavità abbia vissuto una fase speleogenetica pre-quaternaria durante episodi climatici antichi e condizioni morfologiche esterne assai diverse dall'attuale. La grotta rappresenta, quindi, un archivio di processi e relativi agenti utili per la ricostruzione della paleoevoluzione carsica dell'altipiano.

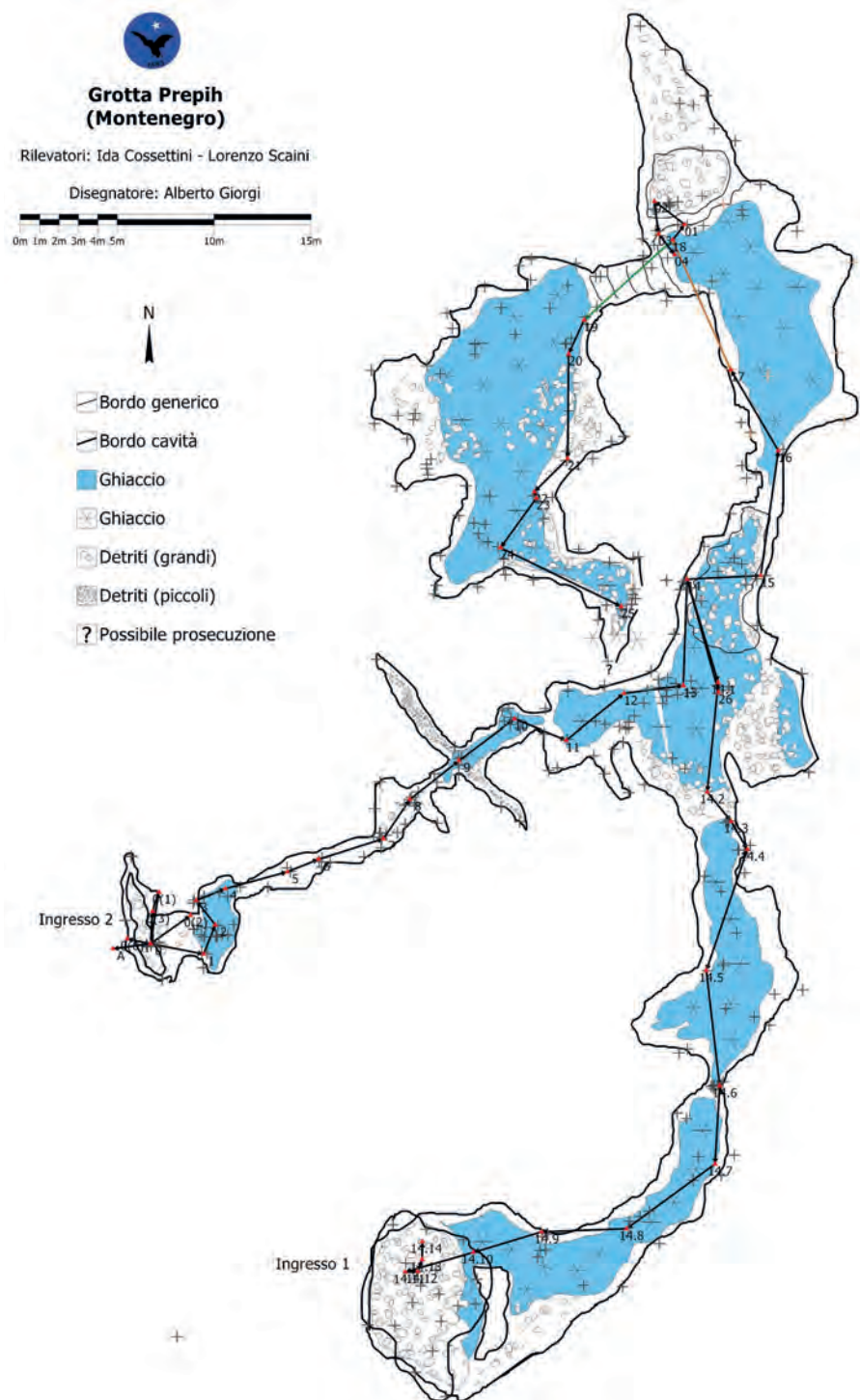


Fig. 19 - Rilievo della Grotta Prepih, pianta e sezione.

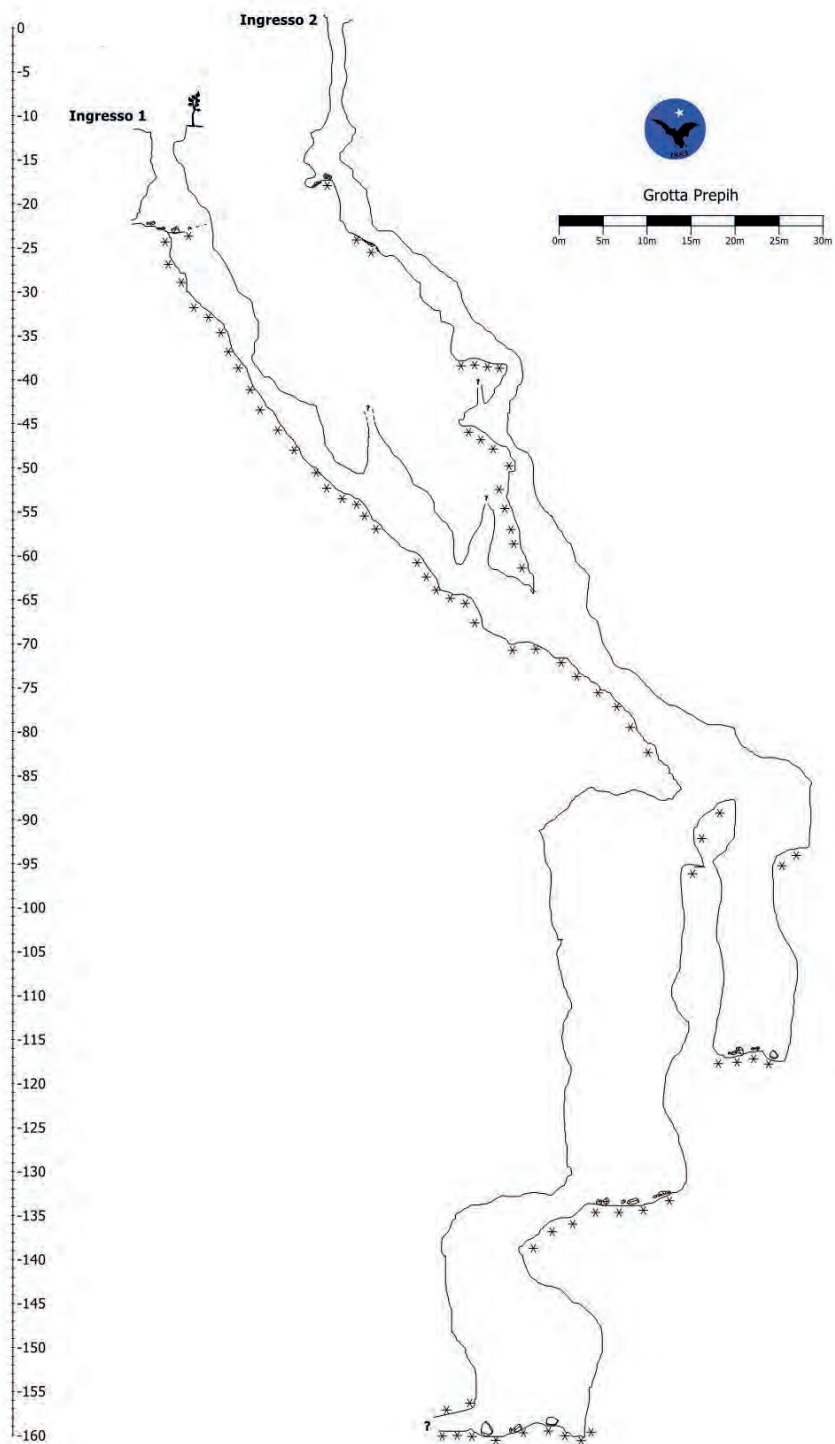




Fig. 20 - Meandro nella grotta Prepih (foto Ida Cossettini).



Fig. 21 - Piccoli pendenti in roccia (foto Ida Cossettini).

Grotta della Stalagmite (Tipo 2)

Quota ingresso: 1860 m	Sviluppo: 8 m	Profondità: 11 m
------------------------	---------------	------------------

La Grotta della Stalagmite è una piccola cavità verticale profonda meno di 10 metri, situata in corrispondenza di una piccola dolina facente parte di un gruppo allineato di cinque sviluppatosi su uno dei pochissimi prati identificati nell'area investigata.

Caratteristiche morfologiche e paleoambientali

Questa grotta, classificata tra le cavità di tipo 2, mostra sulle pareti alcune antiche colate calcitiche ben conservate, osservabili anche nella documentazione fotografica.

Tali strutture sono la prova di condizioni climatiche e idrologiche differenti rispetto all'attuale, riconducibili probabilmente a periodi pluviali antichi. Queste colate testimoniano, come per le maggiori cavità descritte in precedenza, una paleogeografia radicalmente diversa, con livelli di percolazione e condizioni di saturazione calcitica delle acque più pronunciati.

Sul fondo del pozzetto si rinvenivano stalagmiti spezzate da vecchi crolli e successivamente corrose. Questo fenomeno è attribuibile sia ai processi di corrosione per condensazione, sia alla percolazione di acque che dissolvono parzialmente i depositi preesistenti. Tali morfologie fungono quindi da marker ambientale e crono-stratigrafico, confermando l'importanza delle micro-cavità quale archivio di paleoambienti carsici, anche in assenza di estesi volumi ipogei o grandi sviluppi planimetrici.



Fig. 22 - Il fondo della Grotta della Stalagmite (foto Ida Cossettini).



Fig. 23 - Stalagmite spezzata e rimodellata (foto Ida Cossettini).

Rolling Stones (kls029)

Quota ingresso: 1825 m	Sviluppo: 130 m	Profondità: 83 m
------------------------	-----------------	------------------

L'ingresso si apre con un portale che immette in breve corridoio discendente dal quale parte un primo pozzo interno di m 18. Lo sovrasta un camino che sbocca in superficie con uno stretto foro, che viene a costituire un ingresso alto.

La grotta **Rolling Stones** (così denominata per l'instabilità degli accumuli di detrito sui pozzi) rappresenta un esempio significativo di un antico sistema ipogeo successivamente influenzato da processi glaciocarsici (crioclastismo). Sono molto evidenti, infatti, le peculiari modificazioni morfologiche indotte dall'interazione tra i processi quaternari di degradazione e il carsismo.

Evidenze geomorfologiche

Si tratta di un sistema ipogeo caratterizzato da ampie sale interconnesse attraverso pozzi e gallerie di notevoli dimensioni. La morfologia dominante è costituita da ambienti di crollo e da volumi irregolari, con altezze variabili che raggiungono diversi metri.

I pavimenti di tutti i vani presentano accumuli detritici molto abbondanti costituiti da clasti angolosi di dimensioni eterogenee, interpretabili come **crioclasti** prodotti dall'azione del gelo-disgelo sulle pareti rocciose. Questa caratteristica morfologica è diagnostica dei processi glaciocarsici, dove l'alternanza di fasi di congelamento e scongelamento dell'acqua interstiziale provoca la fratturazione meccanica della roccia carbonatica.

L'assenza di forme tipicamente fluviali (evorsioni, scallops, solchi) potrebbe essere dovuta all'asportazione delle morfologie originarie di origine idrodinamica. Unica vestigia dell'antico periodo freatico/epifreatico della cavità è una breve condotta di collegamento tra due pozzi dalla classica forma di origine freatica impostata su una frattura sub-verticale.

Significato Paleoclimatico e Paleoambientale

La presenza di estesi fenomeni glaciocarsici nella cavità fornisce importanti indicazioni sui paleoclimi quaternari della regione montenegrina. L'intensità dei processi crioclastici documentati suggerisce condizioni climatiche particolarmente severe durante le fasi glaciali pleistoceniche, con temperature medie annue molto basse e significative escursioni termiche giornaliere.

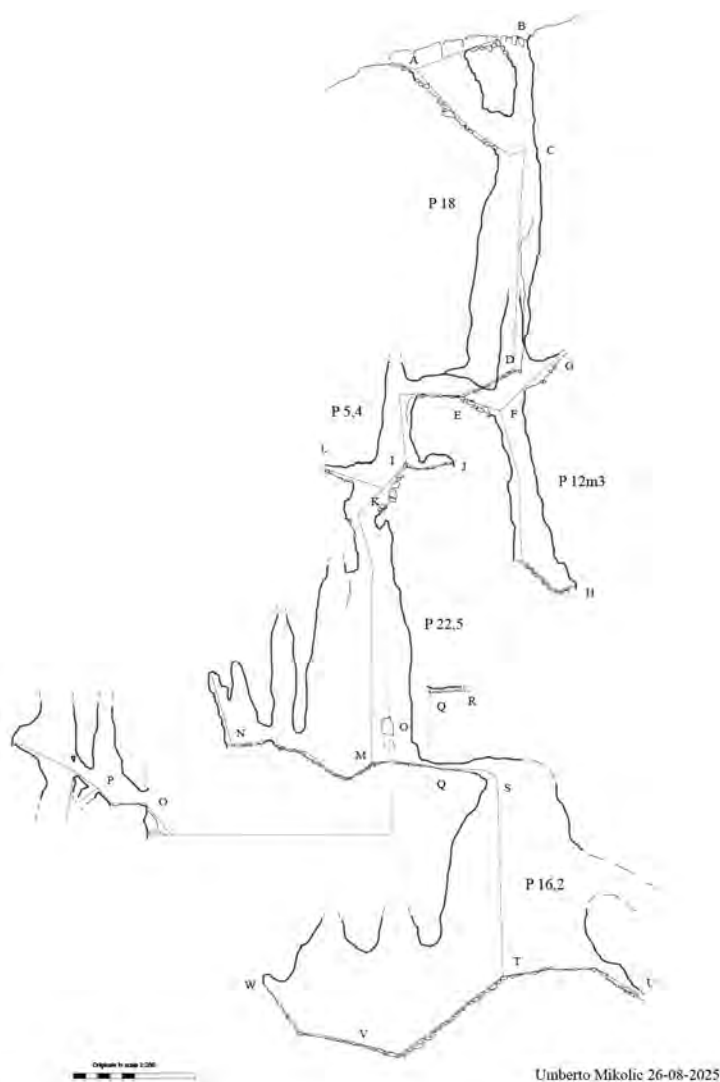
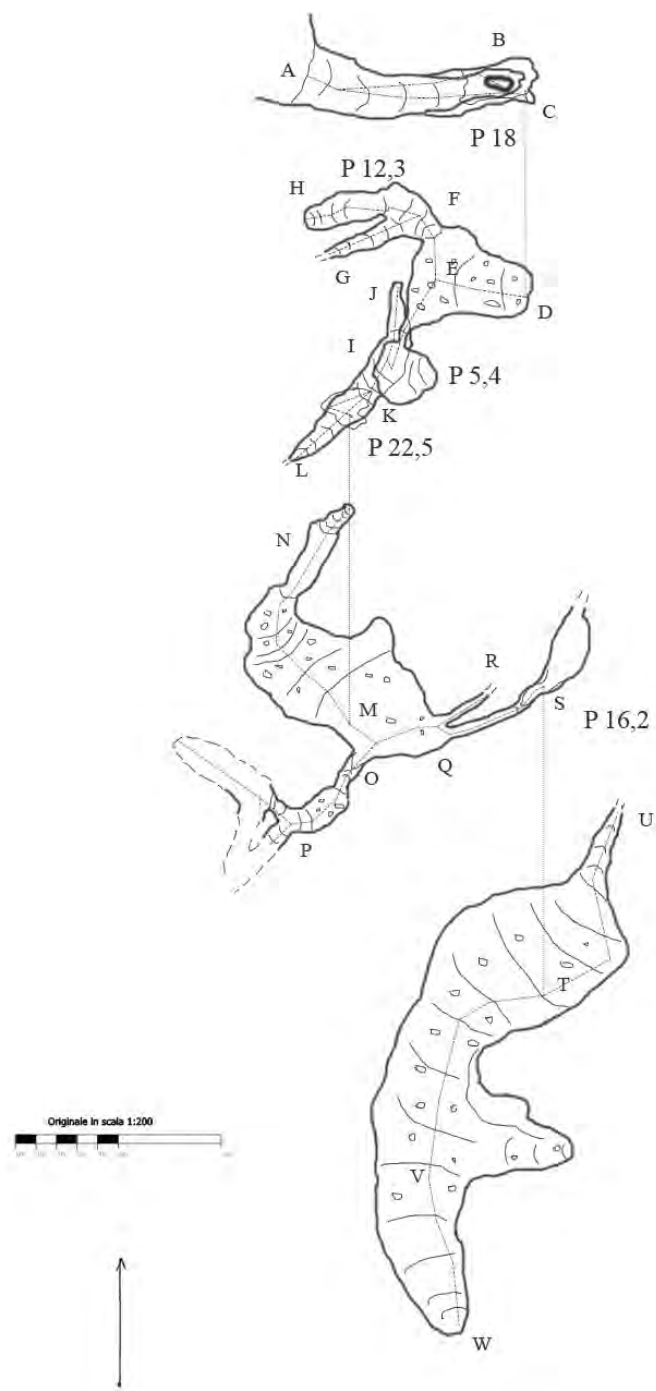


Fig. 24 - Sezione longitudinale della grotta Rolling Stones (Umberto Mikolic).



Umberto Mikolic 26-08-2025

Fig. 25 - Pianta della grotta Rolling Stones (Umberto Mikolic).



Fig. 26 - Piccola condotta freatica (foto Veronika Paulina).



Fig. 27 - Pozzo d'ingresso con evidenti solchi da deflusso (foto Veronika Paulina).



Fig. 28 - Evidenti risultati del crioclastismo (foto Veronika Paulina).

Grotta dell'orso

Quota ingresso: da verificare	Sviluppo:	Profondità:
-------------------------------	-----------	-------------

Questo nome si deve a una particolarità biologica: il pavimento all'ingresso della grotta è disseminato di deiezioni cilindriche di grandi dimensioni.

Aspetti Biologici e Denominazione

La presenza di **feci di grandi dimensioni** all'ingresso della cavità costituisce un indicatore biologico significativo. L'ipotesi della presenza di *Ursus arctos* (orso bruno) per le fasi di letargo invernale è biologicamente plausibile, considerando che le grotte sub-orizzontali con ingresso ampio forniscono condizioni microclimatiche stabili ideali per l'ibernazione. L'orso bruno è storicamente presente nei territori montani del Montenegro, e l'utilizzo di cavità naturali per il letargo rappresenta un comportamento etologico documentato.

Depositi Clastici

La presenza di **detriti mal classificati** (massi metrici e detrito angoloso centimetrico) suggerisce processi di crollo gravitativo attivo e glaciocarsismo. Questa distribuzione granulometrica bimodale è tipica di ambienti di grotta caratterizzati da:

- Instabilità strutturale della volta
- Processi crioclastici stagionali
- Alterazione per carsismo d'infiltrazione

Classificazione nel Gruppo Tipo 2

La classificazione proposta trova giustificazione in tre parametri diagnostici fondamentali:

- Andamento sub-orizzontale articolato, seppur breve.
- Si segnalano depositi di argille rosse che rappresentano un elemento di particolare interesse paleoambientale. Questi depositi, assenti nelle altre cavità della zona, potrebbero derivare dal trasporto e deposizione di materiale alloctono durante fasi paleoclimatiche differenti. L'unicità di questi depositi nella zona suggerisce condizioni genetiche particolari, meritevoli di future analisi mineralogiche e sedimentologiche approfondite.
- Presenza di rare vestigia di speleotemi che indicano fasi di attività concrezionale antica, successivamente interrotta e in seguito degradata. Questo aspetto fornisce informazioni paleoclimatiche e idrogeologiche cruciali per la comprensione dell'evoluzione speleogenetica della zona.

Piccole caverne

Le piccole cavità osservate sui versanti che delimitano l'altopiano carsico di Kučke Planine, poste a quote superiori rispetto agli attuali ingressi delle principali cavità carsiche, rappresentano un elemento di grande rilevanza sotto il profilo speleogenetico.

Queste cavità di modeste dimensioni sono interpretabili come **relitti di antiche condotte idriche freatiche** sviluppatesi nelle fasi iniziali della storia evolutiva del paesaggio e testimoniano le tappe fondamentali dell'evoluzione che hanno interessato la regione nel corso della fase di speleogenesi carsica avvenuta probabilmente nel **Miocene/Pliocene**.



Fig. 29 - Grotte relitto dell'antica rete freatica pre-aterniana (foto Cristiano Toffoletti).

GROTTE NON CLASSIFICABILI

Abisso Ledo

Quota ingresso: 1855 m	Sviluppo: 79 m	Profondità: 130 m
------------------------	----------------	-------------------

L'abisso Ledo rappresenta un sistema carsico di notevole interesse geologico e speleologico, caratterizzato da peculiari fenomeni crionivali che ne condizionano sia la morfologia interna che l'accessibilità esplorativa.

Caratteristiche Morfologiche Generali

La cavità si sviluppa lungo una probabile faglia con orientamento NW-SE, lunga approssimativamente 150 metri, che costituisce il controllo strutturale primario del sistema. Il pozzo principale presenta uno sviluppo verticale di 100 metri, con pareti caratterizzate da estese coperture glaciali perenni.

La temperatura dell'aria misurata sul fondo della cavità (1,7°C) indica condizioni termiche che favoriscono la persistenza delle formazioni glaciali durante tutto l'arco dell'anno, anche se nelle vicinanze dell'ingresso si segnala un forte stillicidio da fusione.

Configurazione degli Ingressi

L'accesso principale presenta dimensioni di 5×10 metri e si apre direttamente sulla discontinuità principale. Due ingressi secondari si localizzano lungo la medesima discontinuità strutturale, procedendo verso nord-ovest. La posizione dell'ingresso principale, situato sotto un blocco roccioso prominente, suggerisce processi di erosione differenziale che hanno portato alla formazione di un riparo naturale di ampie dimensioni.

Morfologia Interna e Processi Crionivali

La discesa iniziale presenta una serie di terrazzi detritici instabili, indicativi di processi gravitativi attivi lungo le pareti della faglia. L'ampio vano di confluenza dove convergono i tre ingressi presenta un pavimento costituito da blocchi caotici e depositi nivali.

Il pozzo d'accesso in profondità (1×2 metri all'imbocco) subisce un significativo allargamento dopo i primi 10 metri, estendendosi verso sud-est. Le "lingue" di ghiaccio scuro persistente rappresentano formazioni crionivali di particolare interesse, forse alimentate da processi di infiltrazione e successivo congelamento delle acque di percolazione.

Fenomeni Glaciali e Formazioni Crionivali

Le pareti del pozzo principale sono rivestite da estese colate glaciali con formazioni di notevole rilevanza estetica e scientifica. La presenza di un "tappo" di neve ghiacciata a circa 40 metri di profondità, attraversabile mediante un passaggio naturale di 1×2 metri, indica la formazione di occlusioni glaciali che possono condizionare significativamente l'accessibilità della cavità.

Il settore terminale attualmente esplorabile presenta una china glaciale mista a depositi di firn che conduce a un piccolo bacino dove si raccoglie l'acqua di fusione e di percolazione. Le colate glaciali che occludono le possibili prosecuzioni suggeriscono che l'estensione reale del sistema potrebbe essere significativamente maggiore di quella attualmente accessibile.

Implicazioni Paleoclimatiche ed Evolutive

La persistenza delle formazioni glaciali anche a profondità considerevoli (oltre 100 metri) indica condizioni microclimatiche abbastanza stabili, probabilmente correlate alla configurazione morfologica della cavità, ai processi di circolazione dell'aria e probabilmente a un



Fig. 30 - Ingresso all'abisso Ledo (foto Aldo Fedel).

comportamento di tipo *cold-trap*. L'eventuale fusione futura di queste masse glaciali, in relazione alle attuali variazioni climatiche, potrebbe rivelare ulteriori sviluppi del sistema carsico profondo attualmente inaccessibile.

La configurazione strutturale dell'abisso Ledo, controllata dalla lunga frattura ben visibile all'esterno, suggerisce una genesi legata ai processi tettonici regionali che hanno interessato l'area, con successiva evoluzione carsica facilitata dalla presenza di litotipi carbonatici molto solubili. Allo stato attuale, non sono state trovate evidenze di alcun tipo che possano aiutare a classificare questa cavità come grotta di Tipo 2.



Fig. 31 - Nel ghiaccio dell'abisso Ledo (foto Alberto Giorgi).

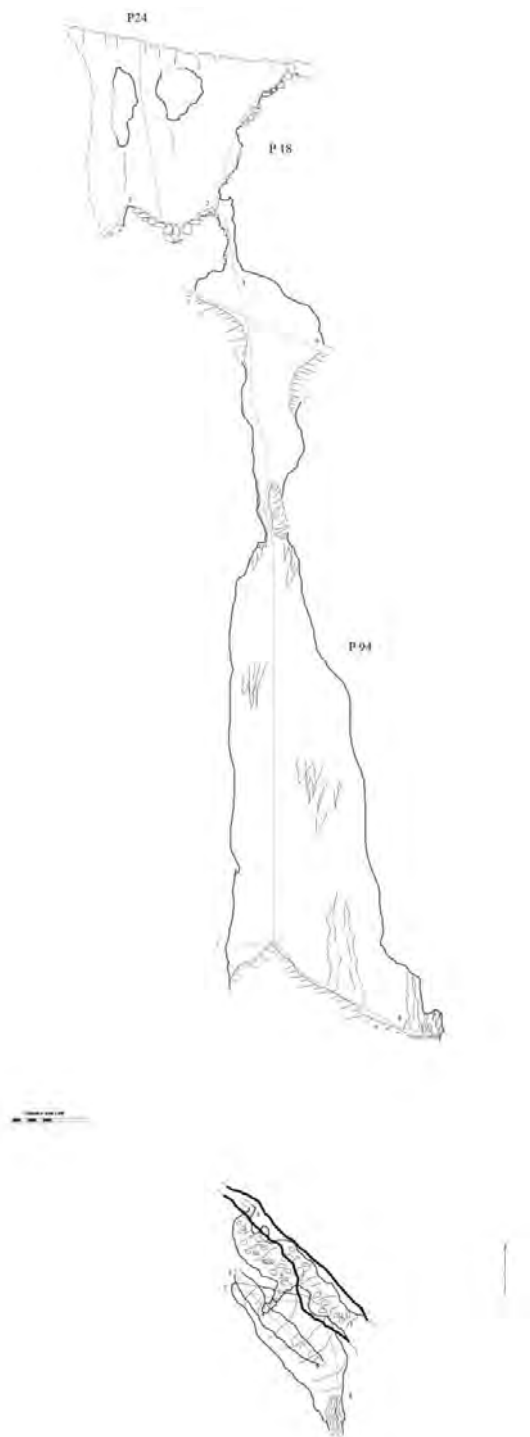


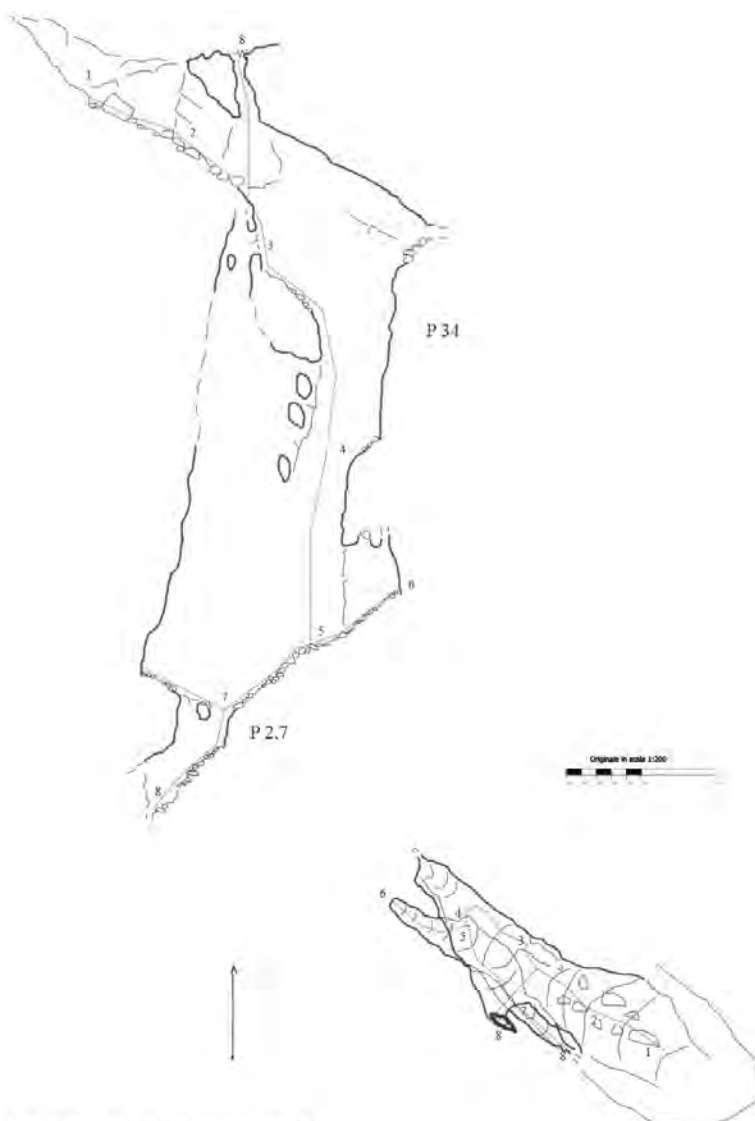
Fig. 32 - Rilievo topografico dell'abisso Ledo (Umberto Mikolic).

KLS025 (Tipo 2)

Quota ingresso: 1847 m	Sviluppo: 130 m	Profondità: 83 m
------------------------	-----------------	------------------

L'ampio ingresso a portale s'apre in una dolina in terreno in pendenza posta sul lato ovest della collina centrale dell'altipiano.

Si tratta di una cavità la cui classificazione nel tipo due è dubbia in quanto non soddisfa alcun criterio di catalogazione, nonostante la geometria generale suggerisca un'origine antica.



Umberto Mikolic 25-08-2025

Fig. 33 - Rilievo topografico della grotta KLS025 (Umberto Mikolic).



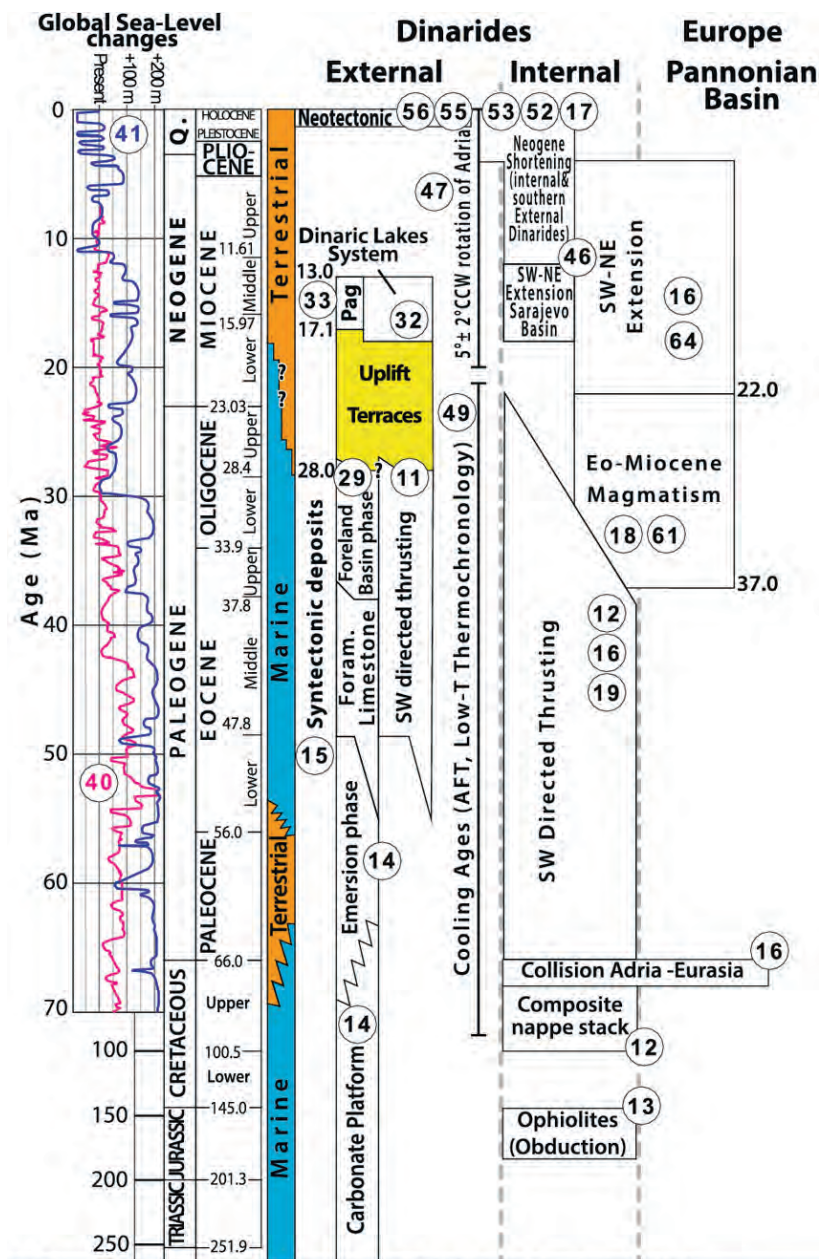
Fig. 34 - Ingresso della grotta KLS025 (foto Umberto Mikolic).

IPOTESI SPELEOGENETICA

Lo studio geomorfologico delle grotte di Tipo 1 e 2 offre una chiave fondamentale per la ricostruzione dell'evoluzione del sistema carsico dell'altopiano di Kučke Planine, in particolare per quanto riguarda la genesi delle cavità più antiche.

Le analisi geomorfologiche speditive indicano l'esistenza di una fase carsica pre-quaderna, durante la quale doveva essere attiva una rete fluviale epigea e ipogea responsabile della formazione di un sistema di pozzi e gallerie. Tali cavità non appaiono collegate agli elementi geomorfologici e idrografici odierni (epicarso), e quindi suggeriscono una genesi in contesti paleogeografici e paleoclimatici profondamente differenti.

Di seguito si illustra un'ipotesi speleogenetica e in parte paleogeografica ottenuta dalle osservazioni effettuate e dalla comparazione con gli studi effettuati in aree con caratteristiche analoghe.



- 12 Schmid et al. (2020) 13 Robertson et al. (2009) 14 Vlahović et al. (2005)
 15 Tari and Mrinjek, (1994) 16 Ustaszewski et al. (2010) 17 van Unen et al. (2019)
 18 Schefer et al. (2011) 19 van Hinsbergen et al. (2020) 29 Zupanić and Babić (2011)
 32 de Leeuw et al. (2012) 33 Jiménez-Moreno et al. (2009) 40 Miller et al. (2005)
 41 Haq et al. (1987) 46 Andrić et al. (2017) 47 Le Breton et al. (2017)
 49 Šrodoň et al. (2018) 52 Picha (2002) 53 Schmitz et al. (2020) 55 Markušić & Herak (1995)
 56 Kuk et al. (2000) 61 Prelević et al. (2005) 64 Horváth et al. (2015)

Fig. 35 - Tabella cronologica che illustra i principali eventi tettonici nelle Dinaridi Esterne e Interne e nell'adiacente Bacino Pannonico settentrionale. (BALLING P. et al., 2021).

Oligocene (34-23 Ma)

La collisione della placca Adriatica con il margine europeo segna l'inizio della strutturazione orogenetica dinarica (SCHMID et al., 2008). Questo evento tettonico fondamentale fornisce il quadro strutturale primario su cui si svilupperà successivamente il carsismo alto-montano della zona di Kučke Planine, definendo l'architettura dei sistemi di fratturazione che controllerà la circolazione idrica sotterranea, creando i prerequisiti geologici per la successiva carsificazione.

Il perdurare della convergenza tettonica innesca sollevamenti regionali, e l'emersione progressiva delle unità carbonatiche crea le condizioni per l'avvio dei **primi processi carsici subaerei**, sebbene ancora limitati dall'assetto strutturale poco maturo.

Miocene Inferiore (23-11 Ma)

Le Dinaridi risultano definitivamente emerse e si organizzano i sistemi idrografici superficiali, l'asportazione di compagini rocciose soprastanti la piattaforma carbonatica e le fasi iniziali di incisione carsica (BABIĆ & ZUPANIČ, 1994). L'organizzazione delle reti di drenaggio superficiale innesca i primi processi significativi di dissoluzione carbonatica, favoriti dalle condizioni climatiche molto piovose del periodo, mentre l'abbassamento graduale del livello di base regionale crea i gradienti idraulici necessari per l'avvio della speleogenesi freatica. Il continuo sollevamento orogenetico intensifica la progressiva organizzazione del drenaggio e favorisce lo sviluppo dei primi sistemi ipogei, nonché delle prime inversioni di rilievo significative su altopiani carbonatici (FLOWER & KENNETT, 1994).

Miocene Superiore–Pliocene (11-2.6 Ma)

Questo intervallo temporale rappresenta la probabile finestra di formazione delle **cavità di Tipo 2** di Kučke Planine. Esso è caratterizzato da forte sottrazione d'acqua al reticolo idrografico superficiale e allo sviluppo estensivo di cavità, successivamente elevate alle quote attuali attraverso l'effetto combinato del sollevamento orogenetico e dell'incisione fluviale. In generale, la morfogenesi di questo periodo produce i caratteristici sistemi ipogei di gallerie sub-orizzontali oggi osservabili come cavità disconnesse dal drenaggio attuale.

Pleistocene (2.6-0.01 Ma)

I cicli glaciali-interglaciali pleistocenici introducono una forte ciclicità nei processi speleogenetici: i periodi **glaciali** riducono drasticamente la speleogenesi a causa delle temperature medie annuali di -6°C al margine delle calotte glaciali (MIHEVC, 2007), mentre le fasi **interglaciali** riattivano parzialmente la dissoluzione carbonatica e l'asportazione dei depositi.

Sull'altopiano di Kučke Planine, l'erosione glaciale e il carsismo (denudazione) riesumano progressivamente le cavità precedentemente riempite o abbandonate e ne modificano l'assetto morfologico portandole gradualmente a uno stato di relitto. I cicli di circa 100.000 anni che caratterizzano il Pleistocene medio-superiore determinano alternanze sistematiche tra fasi di stasi speleogenetica (stadiali) e riattivazione dei processi carsici (interstadiali).

Inizia lo sviluppo dell'epicarso attuale e la speleogenesi delle grotte di tipo 1.

Olocene–Attuale (11.7 ka-presente)

La dinamica periglaciale attuale e i processi gravitativi di versante rimaneggiano continuamente gli ingressi e i vani delle grotte di Kučke Planine, mascherando parzialmente le evidenze morfologiche delle fasi genetiche più antiche.

I processi crioclastici e gravitativi post-glaciali producono l'accumulo di detriti nelle cavità, creando le caratteristiche morfologie di riempimento osservabili nelle **cavità di Tipo 2**, in associazione con il contestuale accumulo di notevoli spessori di ghiaccio, di età molto recente, forse formati durante la **Piccola Età Glaciale** (approssimativamente 1260-1860 d.C.).

Note Metodologiche e Limitazioni

La cronologia evolutiva proposta integra vincoli strutturali e stratigrafici regionali delle Dinaridi con modelli consolidati di carsismo che spiegano efficacemente la genesi dei livelli ipogei e la loro successiva riesumazione in risposta all'incisione del reticolo idrografico e alle oscillazioni climatico-eustatiche quaternarie (LOWE, 2007). L'approccio metodologico utilizzato per l'analisi delle cavità dell'altopiano di Kučke Planine combina l'osservazione geomorfologica con i principi della speleogenesi, utilizzando come analogie i sistemi carsici alpini e dinarici già studiati.

Tuttavia, permangono ragionevoli incertezze sulla tempistica esatta delle fasi di sollevamento tettonica e sull'eventuale riattivazione parziale recente, considerato il complesso mosaico di strutture compressive ed estensionali documentato in Montenegro e nei settori adiacenti delle Dinaridi esterne. L'assenza di datazioni assolute sui depositi di riempimento delle cavità di Kučke Planine limita la precisione cronologica delle ricostruzioni proposte, rendendo necessari futuri approfondimenti analitici attraverso metodi di datazione diretta.

La variabilità locale dei processi morfogenetici e l'eterogeneità dell'assetto strutturale richiedono cautela riguardo i risultati ottenuti sull'altipiano di Kučke Planine, suggerendo la necessità di indagini sistematiche più approfondite per validare il modello evolutivo proposto. Le interazioni complesse tra controlli tettonici, climatici e morfogenetici richiederanno futuri approcci multidisciplinari per una comprensione completa dell'evoluzione dei sistemi carsici montani delle Dinaridi.

CONCLUSIONI

Dal punto di vista geologico, l'area di Kučke Planine è formata da calcari mesozoici con strati di notevole potenza. Nonostante la notevole compattezza, queste rocce sono caratterizzate da un'intensa fratturazione dovuta all'attività tettonica e ai processi di degradazione. La morfologia carsica dell'area è quella tipica delle alte quote e suggerisce un elevato potenziale per ulteriori scoperte speleologiche.

Implicazioni geomorfologiche

Le cavità di origine quaternaria documentano la predominanza dei processi attuali e recenti - principalmente crioclastismo, crollo gravitativo, neotettonica e percolazione. Esse testimoniano la forte dipendenza dalle discontinuità strutturali e dalla morfogenesi correlata a eventi climatici post-glaciali, con assenza di fasi di scorrimento idrico incanalato e profili di instabilità accentuata.

Implicazioni paleoclimatiche e stratigrafiche

Le cavità pre-quaternarie (tipo 2) conservano architetture interne complesse e sedimentazioni stratificate (detriti, ghiaccio, speleotemi) che rappresentano archivi preziosi di condizioni paleoclimatiche e idrogeologiche antiche. La presenza di vani sub-orizzontali, ingressi a caverna e tracce di scorrimento idrico incanalato documenta fasi di speleogenesi pre-glaciale, in ambienti radicalmente diversi dall'attuale.

Implicazioni strutturali ed evolutive

La presenza di due distinte famiglie di grotte rivela la coesistenza di regimi morfogenetici multipli: uno legato alla struttura e tettonica attuale, l'altro alla storia tettonica, idrogeologica e climatica passata. Il confronto sottolinea l'importanza delle strutture tettoniche ereditate (Dinaridi e corrugamenti alpino-dinarici) non solo per il controllo della morfologia superficiale, ma anche per l'evoluzione delle cavità più profonde. Inoltre, le grotte di tipo 2 fungono da

indicatori di stabilità ambientale prolungata, mentre quelle di tipo 1 sono testimoni di processi evolutivi tuttora in atto.

RINGRAZIAMENTI

Si desidera esprimere un sentito ringraziamento alla **Commissione Grotte E. Boegan** per l'indispensabile supporto logistico e finanziario offerto alle attività di esplorazione e alla **Società Alpina delle Giulie** per l'uso dei due furgoni sociali. Un particolare apprezzamento è rivolto a tutti i partecipanti alle spedizioni, il cui impegno, competenza e spirito collaborativo hanno costituito la base indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi esplorativi e scientifici di questa campagna speleologica in Montenegro.

Spedizione 2025

Alberto Giorgi (capo spedizione), Veronika Paulina, Rocco Romano, Silvia Foschiatti, Andrea Lalovich, Adriano Balzarelli, Umberto Mikolic, Laura Bertolini, Cristiano Toffoletti (Commissione Grotte E. Boegan); Daniele Santarossa (Unione Speleologica Pordenonese); Ida Cossettini (Circolo Speleologico Idrologico Friulano di Udine); Lorenzo Scaini (Gruppo Speleologico "Bertarelli" di Gorizia).

Spedizione 2024

Lucio Comello (capo spedizione), Veronika Paulina, Aldo Fedel, Umberto Mikolic, Mario Privileggi, Alberto Giorgi. (Commissione Grotte E. Boegan).

Spedizioni leggere 2022-2023

Lucio Comello, Riccardo Corazzi, Luca Bussani, Lorenzo Marini, Stefano Colaprico (Commissione Grotte E. Boegan).

BIBLIOGRAFIA

- AUDRA P., 2004: *Kitzsteinhorn high-alpine karst (Salzburg, Austria): Evidence of non-glacial speleogenesis*. Die Höhle: 12–17.
- AUDRA P., BINI, A., GABROVŠEK F., HÄUSELMANN P., HOBLÉA F., JEANNIN P.-Y., KUNAVÉR J., MONBARON M., ŠUŠTERŠIĆ F., TOGNINI P., TRIMMEL H., & WILDBERGER, A., 2007: *Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography*. Acta Carsologica: 53–67.
- BALLING P., GRÜTZNER, C., TOMLIJENVIĆ, B., SPAKMAN, W., USTASZEWSKI, K., 2021: *Post-collisional mantle delamination in the Dinarides implied from staircases of Oligo-Miocene uplifted marine terraces*. Scientific Reports: 11.
- BAROVIĆ G., 2023: *Speleology of Montenegro*. Springer Professional.
- BIERMANN P., SCHMITZ, B., MECHERNICH, S., WEISMÜLLER, C., ONUZI, K., USTASZEWSKI, K., & REICHERTER, K., 2022: *Aegean-style extensional deformation in the contractional southern Dinarides: Incipient normal fault scarps in Montenegro*. Solid Earth: 957–974.
- BONACCI O., 1987: *Karst hydrology: With special reference to the Dinaric karst*. Springer.
- COLUCCI R., et al., 2022: *Multi-year evolution of 75 snow and ice deposits in schachtdolines*. Geomorphology.
- ĆULAFIĆ G., & KRSTAJIĆ, J., 2024: *Hydrology of surface water and climate characteristics of Montenegro*. In G. Barović (Ed.), *Speleology of Montenegro: Cave and karst systems of the world: xx–xx*. Springer.

- DELVAUX D., MOSAR, J., & STAPEL, G., 2004: *Sedimentary setting of Adriatic flysch formation (Middle Eocene–Middle Miocene) in the Southern Dinarides (Montenegro)*. *Geologica Balcanica*: 188–201.
- DIJUROVIĆ P., 2020: *Genesis of the Pleistocene hummocky moraines in the Moračke Planine, Montenegro*. Glasnik Srpskog Geografskog Društva.
- FORD D., & WILLIAMS, P., 2007: *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley.
- FRANKL A., LENAERTS, T., RADUSINOVIĆ, S., SPALEVIĆ, V., & NYSSSEN, J., 2016: *The regional geomorphology of Montenegro mapped using land surface parameters*. *Zeitschrift für Geomorphologie*: 60.
- HUGHES P.D., WOODWARD, J.C., & GIBBARD, P.L., 2010: *Little Ice Age glaciers in the Balkans: Low altitude glaciation enabled by cooler temperatures and local topoclimatic controls*. *Earth Surface Processes and Landforms*: 35(2).
- HUGHES P.D., et al., 2011: *Reply: The glacial history of the Dinaric Alps, Montenegro*. University of Manchester Research.
- HUGHES P.D., et al., 2012: “*The glacial history of the Dinaric Alps, Montenegro*” – Response to comments. *Quaternary Science Reviews*.
- HUGHES P.D., WOODWARD, J.C., & GIBBARD, P.L., 2017: *Quaternary glaciation in the Mediterranean mountains: A new synthesis*. Geological Society, London, Special Publications: 433, 1–23.
- JEREMIĆ M., & MILOŠEVIĆ, M., 2022: *The primary and secondary mineral resources of Montenegro and their development possibilities*. *Geologia Croatica*: 189–202.
- KALUĐEROVIĆ M., & MIHAJEVIĆ, D., 2021: *Geological and tectonic characteristics of Montenegro*. *Albanian Journal of Natural & Technical Sciences*: 52, 1–15.
- KASPRAK A. H., SEPÚLVEDA, J., PRICE-WALDMAN, R., WILLIFORD, K. H., SCHOEPPER, S. D., HAGGART, J. W., WARD, P. D., SUMMONS, R. E., & WHITESIDE, J. H., 2015: *Geochemical records of the end-Triassic crisis preserved in a deep marine section of the Budva Basin (Dinarides, Montenegro)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*: 436, 187–203.
- KLIMCHOUK A. B., 1995: *Morphogenesis and hydrodynamics in the epikarst zone*. In *Atti del Convegno Internazionale sul Carsismo*. Università di Kiev.
- KLIMCHOUK A. B., FORD, D. C., PALMER, A. N., & DREYBRODT, W., 2000: *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. NCKRI.
- MARKOVIĆ S. B., WOODWARD, J. C., MARIJANOVIĆ, M., ANTIĆ, A., HUGHES, P. D., SPALEVIĆ, V., MARKOVIĆ, R., RADAKOVIĆ, M., BRĐANIN, E., LUKIĆ, T., & TOMIĆ, N., 2025: *An integrated glacial geosite assessment framework and its application in Montenegro: Inventory, evaluation, and prospects for geotourism*. *International Journal of Geoheritage and Parks*: 13(3).
- PALMER A. N., 2007: *Cave geology*. Cave Books.
- PETROVIĆ A., 2014: *A reconstruction of the Pleistocene glacial maximum in the Žijovo Range (Prokletije Mountains, Montenegro)*. *Acta Geographica Slovenica*: 54(2).
- RADUSINOVIĆ S., & PAJOVIĆ, M., 2024: *Geology of Montenegro*. In G. Barović (Ed.), *Speleology of Montenegro: Cave and karst systems of the world*: xx–xx. Springer.
- RADUSINOVIĆ, S., & PAPADOPOULOS, A., 2021: *The Potential for REE and Associated Critical Metals in Karstic Bauxites and Bauxite Residue of Montenegro*. *Minerals*, 11(9), 975.
- SCHMID S. M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., & MATENCO, L., 2008: *The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units*. *Swiss Journal of Geosciences*: 101, 139–183.
- SPÖTL C., BAKER, J. L., SKIBA, V., HONLAT, A., FOHLMEISTER, J., LUETSCHER, M., & TRÜSSEL, M., 2024: *Speleothems in subglacial caves: An emerging archive of glacial climate history and mountain glacier dynamics*. *Quaternary Science Reviews*: 333.
- TARI V., 2002: *Evolution of the northern and western Dinarides: A tectonostratigraphic approach*. EGU Stephan Mueller Special Publication Series: 1, 223–236.
- TARI V., 2007: *Geodynamic evolution of the Dinarides*. *Marine and Petroleum Geology*: 24, 495–513.

- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021: *The mineral industry of Montenegro in 2020–2021*. Minerals Yearbook, Vol. 3, Area Reports: International.
- USTASZEWSKI K., KOUNOV, A., SCHMID, S. M., & SCHALTEGGER, U., 2008: *Late Cretaceous intra-oceanic magmatism in the internal Dinarides*. Lithos: 108, 90–118.
- ZUPAN HAJNA N., MIHEVC, A., PRUNER, P., & BOSÁK, P., 2008: *Paleomagnetism and magnetostratigraphy of Pliocene sediments from the Dinaric karst*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology: 259, 388–397.

FONTI WEB VERIFICATE

- ADAPTATION FUND. (2023). *Adaptation to Climate Change and Resilience in the Montenegrin Mountains*. Link: https://www.adaptation-fund.org/wp-content/uploads/2023/03/AFB.PPRC_31.15-Proposal-for-MONTENEGRO.pdf
- CLIMATE CHANGE KNOWLEDGE PORTAL. (2024). *Montenegro - Country Overview*. World Bank. Link: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/montenegro>
- IUCN PORTAL. (2023). *Enhancing Nature-based Solutions in Montenegro*. Link: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2023-037-En.pdf>
- MONTENEGRO THIRD NATIONAL COMMUNICATION ON CLIMATE CHANGE. (2019). Link: <https://www.sustainability.gov/pdfs/ggi-montenegro-tnc.pdf>
- PMC. (2020, April 1). Investigation of the vulnerability of a partly covered karst feature in Bosnia and Herzegovina. *PMC*. Link: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7244619/>
- UNECE. (2023). New Environmental Performance Review of Montenegro finds waste issues and adaptation challenges. Link: <https://unece.org/environment/press/new-environmental-performance-review-montenegro-finds-waste-issues-and-adaptation>
- UNITED NATIONS IN MONTENEGRO. (2016, April 21). Our Changing Planet. Link: <https://montenegro.un.org/en/43433-our-changing-planet>