

BOSSEA MMXIII

CONGRESSO NAZIONALE

LA RICERCA CARSOLOGICA IN ITALIA

Frabosa Soprana (Cn) – Grotte di Bossea
22-23 giugno 2013

ATTI

LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO DI BOSSEA
STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA CAI CUNEO – COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI

Condizionamento geo-strutturale ed analisi tridimensionale del sistema carsico del Monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana)

LEONARDO PICCINI (*)

RIASSUNTO

Lo sviluppo e l'evoluzione di un sistema carsico dipendono da molteplici fattori legati soprattutto all'assetto geo-strutturale del corpo roccioso in cui il sistema si sviluppa e alle vicende tettoniche e paleo-idrologiche che si succedono nel tempo. Distinguere gli effetti dei primi fattori, che hanno un ruolo essenzialmente passivo, dai secondi, che invece interagiscono attivamente con lo sviluppo del sistema carsico, non è semplice e richiede prima di tutto la modellizzazione tridimensionale accurata delle grotte conosciute. Studi di questo tipo sono di fatto perseguibili solo in quei sistemi dove le esplorazioni speleologiche hanno permesso una conoscenza approfondita del reticolo sotterraneo.

Il Complesso Carsico del Monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana) è uno dei sistemi carsici maggiormente sviluppati e meglio conosciuti del territorio italiano. Contrariamente a quanto avviene in molti altri casi, la particolare struttura geologica del Monte Corchia fa sì che in questo sistema siano particolarmente riconoscibili gli effetti dei fattori tettonici (sollevamento) e paleo-idrologici (progressivo abbassamento del livello di base). L'analisi tridimensionale del sistema ha comunque reso evidente il condizionamento geo-strutturale, che varia nelle varie fasi evolutive in conseguenza del diverso assetto idro-morfologico.

In questi ultimi anni, vari strumenti software permettono una modellizzazione accurata dei sistemi carsici e un'analisi morfometrica meno affetta da influenze soggettive legate alla "percezione" personale dell'operatore. Il modello tridimensionale del sistema carsico del Corchia, sebbene non ancora completo, permette di valutare il condizionamento geo-strutturale con accuratezza e quindi di mettere maggiormente in risalto gli effetti della evoluzione paleo-idrologica locale.

KEY WORDS: *sistema carsico, livello di base, speleogenesi, Alpi Apuane.*

INTRODUZIONE

Durante tutte le fasi del loro sviluppo, i sistemi carsici si trovano a poter "scegliere" tra discontinuità con caratteristiche differenti che influenzano in maniera diversa lo sviluppo dei condotti. Queste discontinuità possono essere ricondotte a tre tipi: 1- superfici litologiche (per lo più coincidenti con le superfici di strato), 2- superfici di dislocazione (con o senza movimento), 3- superfici di clivaggio (in particolare il clivaggio di frattura). L'influenza delle superfici litologiche è maggiore quando mettono a contatto litotipi con una diversa solubilità o una differente risposta agli stress tettonici, mentre

fratture, faglie e sovrascorrimenti si manifestano a volte con fasce di roccia cataclasata e quindi più permeabile. Le superfici di clivaggio, quando presenti, hanno invece un ruolo minore e determinano un aumento della anisotropia della roccia che può portare a un differente grado di solubilità nelle diverse direzioni.

I fattori che influenzano la scelta di una superficie piuttosto che un'altra sono sostanzialmente due: 1- fattori lito-strutturali: sono privilegiate quelle discontinuità che permettono già dalle prime fasi di sviluppo dei condotti un flusso idrico maggiore; 2- fattori idrogeologici: vengono privilegiate quelle discontinuità che consentono un deflusso più breve, e quindi secondo un gradiente più favorevole, verso i punti di emergenza (KLIMCHOUK & FORD, 2000).

In questi ultimi anni ha avuto un discreto riscontro il modello dell' "inception horizon" (letteralmente "orizzonte di innesco") proposto da LOWE nel 1992 (e pubblicato nel 2000) e recentemente ripreso da FILIPPONI (FILIPPONI *et alii*, 2009; SAURO *et alii*, 2013). Secondo tale principio la speleogenesi s'impone, sin dalle fasi iniziali, in precisi orizzonti stratigrafici, caratterizzati da condizioni più favorevoli allo sviluppo di condotti carsici, che poi si mantengono nel tempo come superfici di sviluppo preferenziale in condizioni freatiche prima e vadose poi. Tale modello non può però essere generalizzato e, di fatto, al momento è stato testato solo in situazioni con assetto strutturale a strati orizzontali o poco inclinati. AUDRA & PALMER (2013) invece danno maggiore importanza ai fattori idrogeologici riconoscendo nella zona di oscillazione piezometrica, la cosiddetta zona epifreatica, la fascia di maggior sviluppo di condotti carsici e delegando quindi alla dinamica nel tempo di questa zona la presenza di livelli altimetrici con maggior sviluppo di condotti sotterranei ("cave levels" di PALMER, 1987).

Il Complesso Carsico del Monte Corchia (CCMC) è uno dei più vasti sistemi sotterranei italiani, con uno sviluppo stimato di almeno 65 km e una profondità di 1187 m (FALLANI & PICCINI, 1990). L'elevata conoscenza, ottenuta in oltre 160 anni di esplorazioni portate avanti con una sistematicità che hanno pochi uguali al mondo in una grotta tecnicamente impegnativa, consente di indagare il diverso peso che i fattori geo-strutturali e quelli idrogeologici hanno avuto nel tempo sulla speleogenesi.

Per il Corchia, gli effetti della struttura sull'andamento del sistema nel suo insieme non sono però di facile determinazione a causa della complessa geometria della struttura ospite. Inoltre, si tratta di un sistema molto complesso dal punto di vista morfologico, caratterizzato da una lunga storia evolutiva

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Via G. La Pira, 4 - 50121 Firenze.
Società Speleologica Italiana; e-mail: leonardo.piccini@unifi.it

(PICCINI, 1991, 1994, 1998, 2011b).

parte dell'unità metamorfica delle Alpi Apuane, affiorante in

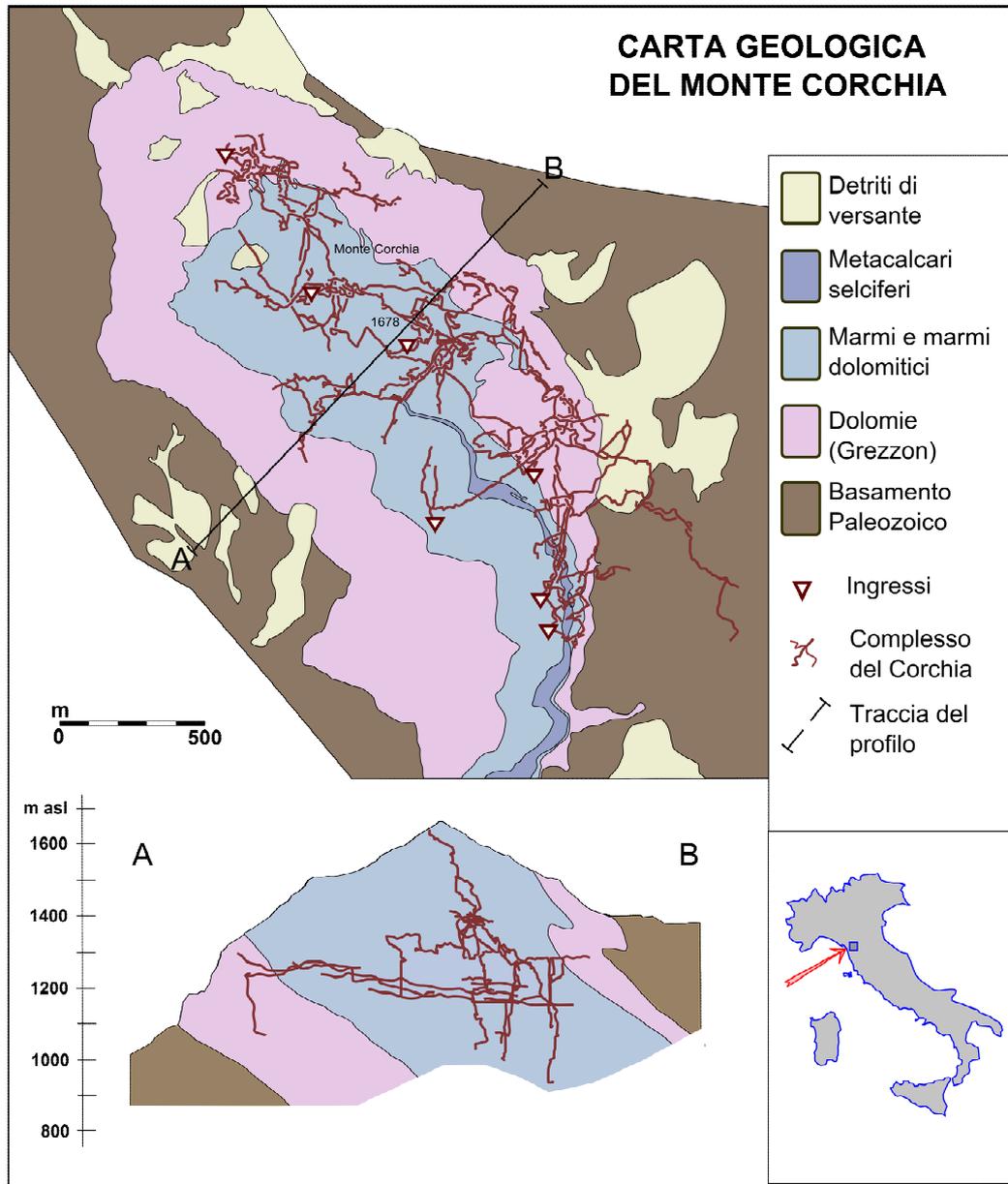


Fig. 1 – Carta geologica del Monte Corchia (da PICCINI, 2011b, modificato).

In casi come questi un approccio bidimensionale, quale si può avere dall'analisi di rilievi cartacei, non è sufficiente a chiarire i rapporti tra reticolo carsico e struttura, ma diventa necessario realizzare un modello vettoriale tridimensionale per poter definire con rigore il controllo strutturale. Questa breve nota riporta i primi risultati dell'analisi morfometrica del modello 3D del CCMC.

ASSETTO GEO-STRUTTURALE DEL MONTE CORCHIA

Il Complesso Carsico del Monte Corchia si sviluppa all'interno di una successione di rocce carbonatiche che fa

finestra tettonica nella Toscana nord-occidentale (Fig. 1) (CARMIGNANI & GIGLIA, 1984; PICCINI *et alii*, 2008).

Al di sopra di un basamento paleozoico scistoso-filladico e di livelli di meta-areniti e meta-conglomerati permo-triassici (Verrucano) intensamente deformati, si trova una sequenza di piattaforma costituita essenzialmente da dolomie ben stratificate o brecciate (Grezzoni – Carnico Norico), marmi dolomitici, breccie marmoree e marmi (Lias), che passano verso l'alto a meta-calcarei con liste e noduli di selce ricristallizzata (Lias medio). Tra Grezzoni e marmi s.l. si trova un orizzonte di breccie (Breccie di Seravezza) e lenti di scisti a cloritoide, che rappresentano un livello di netta discontinuità litologica, rispetto a una sequenza carbonatica sostanzialmente omogenea, almeno per quanto riguarda lo sviluppo dei fenomeni carsici (PICCINI, 1991).

L'altro orizzonte che si differenzia notevolmente è quello dei meta-calcarei selciferi, che rappresenta un livello pressoché continuo al tetto dei marmi, per la presenza dei letti di selce.

Il M. Corchia è caratterizzato da una struttura geometrica molto complessa (Fig. 1) che può ricondursi essenzialmente a una sinclinale isoclinale ribaltata, e quindi con geometria anticlinale, il cui asse immerge, notevolmente inclinato, verso NE (CARMIGNANI & GIGLIA, 1983). Il nucleo della sinclinale è costituito dai meta-calcarei selciferi, che separano con continuità la parte della struttura a giacitura normale da quella a giacitura inversa ma ugualmente inclinata.

L'assetto generale, al di là della ripetizione in ordine inverso della successione carbonatica con il piano assiale della piega che funge da superficie di simmetria, è quindi quello di una monoclinale inclinata mediamente sui 40-50°, la cui vergenza passa da SW nella parte settentrionale a W in quella meridionale.

Nelle formazioni carbonatiche affioranti al nucleo della sinclinale, le principali superfici di discontinuità sono legate alle superfici litologiche e a quelle di clivaggio, che formano tra loro un angolo piccolo e la cui giacitura ha un'immersione compresa tra 50° e 100° N con un'inclinazione media intorno a 50°. Altre superfici particolarmente evidenti, condizionando fortemente la morfologia di superficie, sono quelle legate a famiglie di fratture ad andamento prevalentemente verticale e orientate in direzione NW-SE, SW-NE ed E-W.

METODI

Nel maggio del 2010 ha preso avvio un progetto, patrocinato dalla Federazione Speleologica Toscana, che ha come obiettivo l'aggiornamento del rilievo del CCMC e la sua digitalizzazione anche al fine di ricavare il modello tridimensionale del sistema utilizzando specifici software di uso speleologico. Per facilitare il lavoro, il sistema è stato diviso in cinque settori, su basi morfologiche e storico-esplorative, agganciati su caposalda principali.

La prima parte del lavoro è consistita nella raccolta di tutti i dati di poligonale reperibili dagli archivi dei gruppi speleologici. Tali dati sono stati inseriti in un database in forma di tabelle che riportano le misure di lunghezza, azimut e inclinazione, oltre alle misure di larghezza (sinistra-destra) e altezza (basso-alto) relative a sezioni verticali posizionate su ogni punto di rilievo e orientate perpendicolarmente al tiro di rilievo stesso. Le misure di larghezza e altezza, quando non rilevate direttamente in grotta, sono state ricavate dai disegni su carta. Per le diramazioni di cui non esistevano dati si è provveduto a ricalcolare delle poligonali fittizie dal disegno di pianta e sezione. I dati sono stati organizzati in file separati per ogni diramazione e successivamente processati con l'utilizzo del software Compass (FISH, 2000).

Le analisi sono state eseguite sull'intero database e su parti di esso, selezionate con criteri altimetrici o morfologici. Si tratta per o più di analisi statistiche sulla distribuzione spaziale dell'insieme dei condotti e analisi qualitative di interpretazione

geometrica ottenuta variando il punto di vista del modello 3D.

I dati sono ancora incompleti, mancando diverse importanti diramazioni, e ancora in fase di sistemazione, al fine di ottenere una rappresentazione completa e fedele di tutto il sistema, ma già si prestano a una analisi morfometrica preliminare che mette in luce alcune caratteristiche morfologiche dell'intero complesso.

RISULTATI

Il modello tridimensionale del CCMC consta attualmente di 5870 tratte di poligonale, per una lunghezza complessiva di 46,1 km, pari a circa il 70% dell'intero sistema.

In tabella 1 sono riassunti i principali parametri dimensionali, che si prestano al calcolo degli indici morfometrici riportati in tabella 2 (KLIMCHOUCK, 2003; PICCINI, 2001, 2011a).

TABELLA 1

Parametri dimensionali del CCMC (70 % del totale)

Parametro dimensionale	
Dislivello (D)	1187 m
Sviluppo spaziale (Ss)	46,1 km
Sviluppo planimetrico (Sp)	36,1
Estensione (E)	1829 m
Area totale (rettangolare) (At)	3,37 km ²
Area grotta (Ag)	11,74 hm ²
Volume totale (Vt)	3,88 km ³
Volume grotta (Vg)	1,47 hm ³
Diametro medio (Dm)	5,7 m

TABELLA 2

Principali indici morfometrici

Indice morfometrico	Formula	Referenza	Valore
Volume specifico	Vg/Ss	KLIMCHOUCK, 2003	31,9
Densità di reticolo	Sp/At	KLIMCHOUCK, 2003	0,0107
Porosità carsica	Vg/Vt	KLIMCHOUCK, 2003	0,0004
Indice di verticalità	D/Ss	PICCINI, 2001	0,025
Indice di orizzontalità	Sp/Ss	PICCINI, 2001	0,78
Indice di complessità orizzontale	Sp/E	PICCINI, 2001	19,7

Gli indici proposti da KLIMCHOUCK sono stati ideati soprattutto per descrivere i grandi sistemi labirintici a sviluppo orizzontale tipici dei gessi dell'Ucraina e per grotte come il Corchia sono poco significativi. Da notare come per quanto il Corchia venga spesso chiamata "La montagna vuota" in realtà il volume di grotta conosciuto occupa solo lo 0,5 per mille del volume del parallelepipedo di roccia che racchiude il sistema.

Sulla base degli indici proposti da PICCINI (2001, 2011) il CCMC ha un indice di orizzontalità pari a 0,78, che è decisamente elevato per una grotta di oltre 1000 m di profondità, e un indice di complessità orizzontale pari a 19,7, valore che spesso si riscontra in sistemi labirintici di origine ipogenica. Tutto questo indica una storia evolutiva lunga e complessa in cui il sistema è passato attraverso varie fasi di "maturazione" in condizioni di relativa stabilità del livello di base (PICCINI, 2011b). Tale situazione è ben messa in evidenza dal grafico che mostra la distribuzione altimetrica dei condotti carsici (Fig. 2) e in particolare dei condotti di origine freatica ed epifreatica (Fig. 3).

Tale analisi mostra la presenza di livelli di sviluppo preferenziale che per la particolare struttura del Monte Corchia non possono essere imputati a un controllo lito-strutturale (vedi

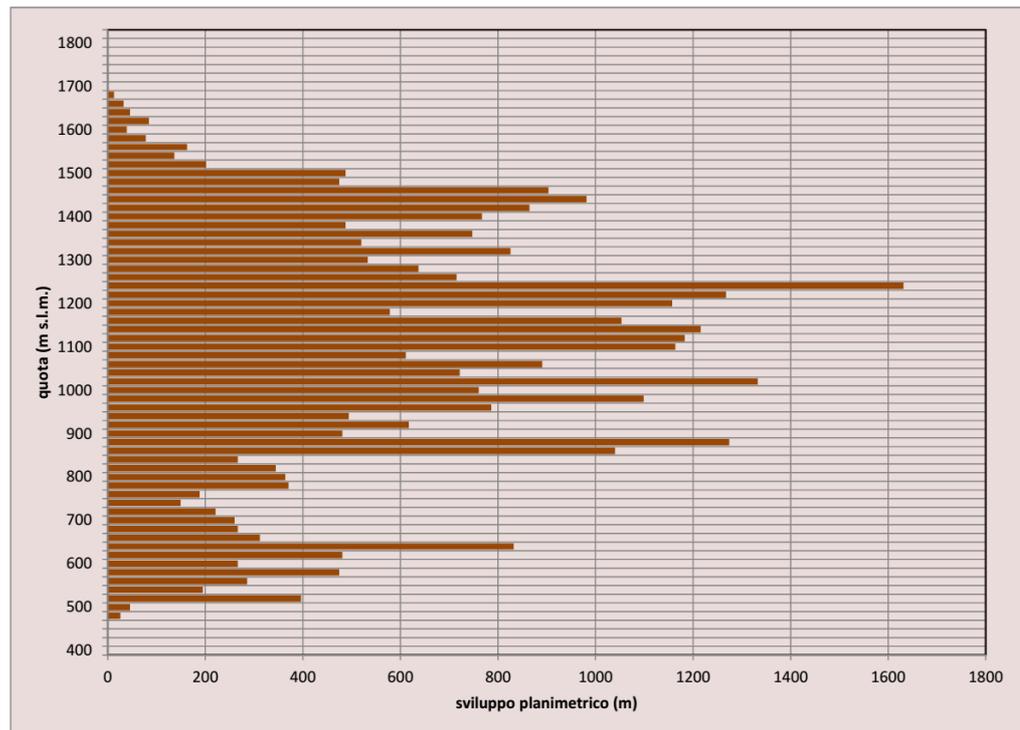


Fig. 2 – Distribuzione altimetrica dei condotti carsici nel Complesso Carsico del M. Corchia, elaborazione delle poligonali di rilievo con esclusione dei tiri di rilievo con lunghezza inferiore a 3 m.

sezione in Fig. 1). In altre parole, la disposizione spaziale delle superfici litologiche non ha esercitato un controllo sulla distribuzione altimetrica dei condotti, questo non significa che non esistano livelli più favorevoli allo sviluppo del carsismo, che però sono interessati da condotti la cui posizione è determinata dalla interazione tra struttura e fattori idrogeologici, in particolare la posizione della fascia di oscillazione piezometrica (PICCINI, 2011b).

Il condizionamento strutturale, cioè il ruolo dell'orientamento delle discontinuità primarie (litologia) e secondarie (faglie e fratture), appare in prima battuta di difficile definizione anche per quanto riguarda l'orientamento dei condotti. Il classico grafico a rosa con indicate le direttrici di sviluppo in piante dell'insieme dei condotti carsici (Fig. 4) non mostra infatti particolari direzioni preferenziali, se consideriamo l'intero sistema, benché siano presenti famiglie di fratture ben evidenti sul terreno, anche per il modo in cui determinano la forma esterna della montagna. Nel grafico si può comunque notare un maggior sviluppo per le direzioni che ricadono nel quadrante SE, vale a dire secondo quella che è la direzione di flusso del sistema nel suo complesso.

I risultati cambiano invece in modo significativo se l'analisi delle direzioni di sviluppo preferenziale considera solo i condotti presenti in particolare fasce di quota.

Per semplicità il sistema è stato suddiviso in quattro intervalli altimetrici di 300 m di dislivello ciascuno corrispondenti a: 1600-1300, 1300-1000, 1000-700, 700-400m s.l.m. Queste fasce di quota comprendono i quattro "piani" principali di sviluppo del Corchia (Fig. 3).

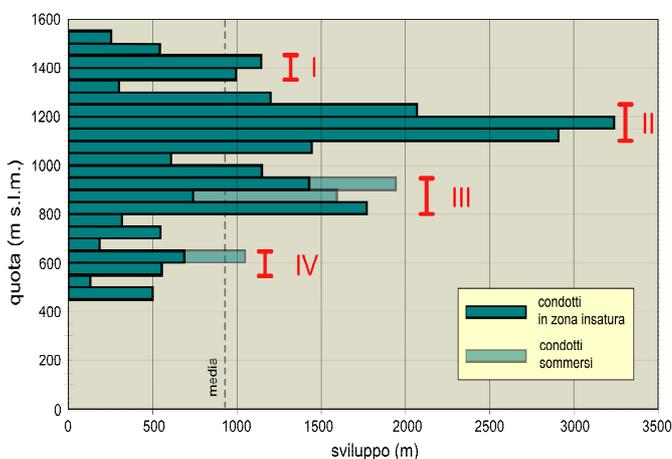


Fig. 3 – Distribuzione altimetrica dei principali condotti carsici di origine freatica o epifreatica nel Complesso Carsico del M. Corchia, con evidenziati i 4 livelli principali (da PICCINI, 2011b, modificato).

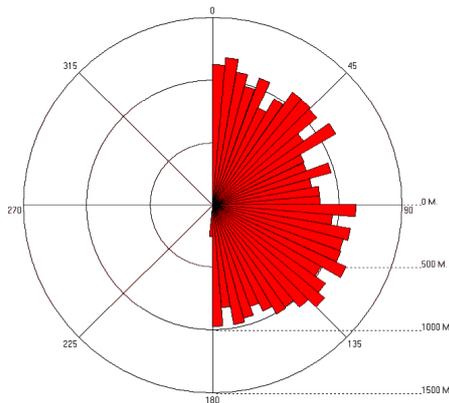


Fig. 4 - Diagramma a rosa delle direttrici di sviluppo dei condotti carsici nel CCMC, elaborazione delle poligonali di rilievo con esclusione dei tiri di rilievo con lunghezza inferiore a 3 m.

I risultati dell'analisi sono mostrati in figura 5, che rappresenta in modo schematico l'andamento in pianta del sistema, accompagnato da quattro semi-diagrammi a rosa che evidenziano chiare direzioni di sviluppo preferenziale per ogni livello altimetrico.

In particolare, il livello più alto (1600-1300) mostra due direttrici preferenziali: una NE-SW, corrispondente a una grossa frattura particolarmente evidente anche in superficie, e una WNW-ESE che corrisponde alla direzione delle superfici litologiche e di quelle di clivaggio. Questo piano comprende le più antiche gallerie del Corchia, la cui formazione va fatta risalire ad almeno 1,5-2 milioni di anni fa (PICCINI *et alii*, 2008; PICCINI, 2011b) e che contengono i segni di una discreta rielaborazione a pelo libero e depositi alluvionali di chiara provenienza esterna.

Il secondo livello è quello più sviluppato e ad andamento più labirintico, secondo almeno tre direttrici di sviluppo principali orientate circa N-S, NE-SW e WNW-ESE.

Il terzo livello mostra un maggiore controllo da parte di fratture orientate con preferenza circa N-S ed E-W. La prima direzione è da mettere in relazione sia con fratture sia con superfici litologiche, marcate dalla presenza di livelli pelitico-scistosi al passaggio tra Grezzoni e Marmi e da livelli discontinui di breccie poligeniche a matrice filladica (Breccie di Seravezza auct.), la seconda è invece legata unicamente a fratture.

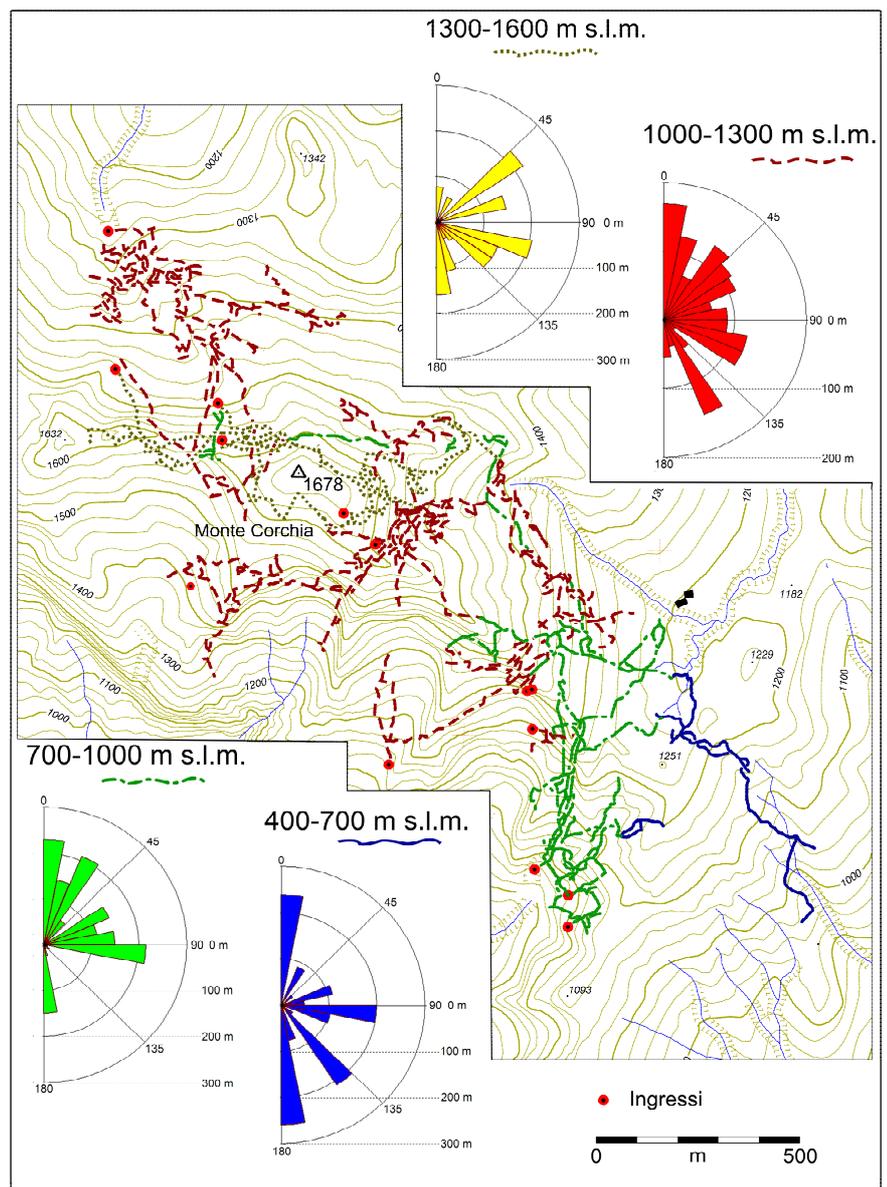
Fig. 5 - Schema planimetrico del CCMC e grafici di direzioni di sviluppo preferenziale dei condotti di origine freatica: a) livello alto di gallerie posto tra 1600 e 1300 m di quota; b) livello medio posto tra 1300 e 1000 m; c) livello basso posto tra 1000 e 700 m di quota; d) l'attuale percorso del collettore sotterraneo (da: PICCINI, 2011b, modificato).

Infine, il quarto livello, che in realtà ha uno sviluppo conosciuto molto minore degli altri tre, mostra un netto orientamento preferenziale secondo direttrici circa N-S.

DISCUSSIONE

La semplice visione in 3D del sistema con varie orientazioni permette già di fare alcune interessanti osservazioni.

La sezione verticale sul piano NW-SE mostra un andamento discendente da NW a SE secondo più livelli inclinati di circa 20° (Fig. 6). Tale inclinazione, diversamente da quanto avviene in altri sistemi carsici sviluppati in strutture monoclinali, non è dovuta a un controllo strutturale, essendo le giaciture delle superfici litologiche mediamente immergenti verso NE (cioè perpendicolarmente alla sezione di Fig. 6) con pendenze solitamente di 40-50°. Si tratta quindi probabilmente di una inclinazione che dipende da fattori idrogeologici e che si spiega ammettendo una o più fasi con importante flusso a pelo



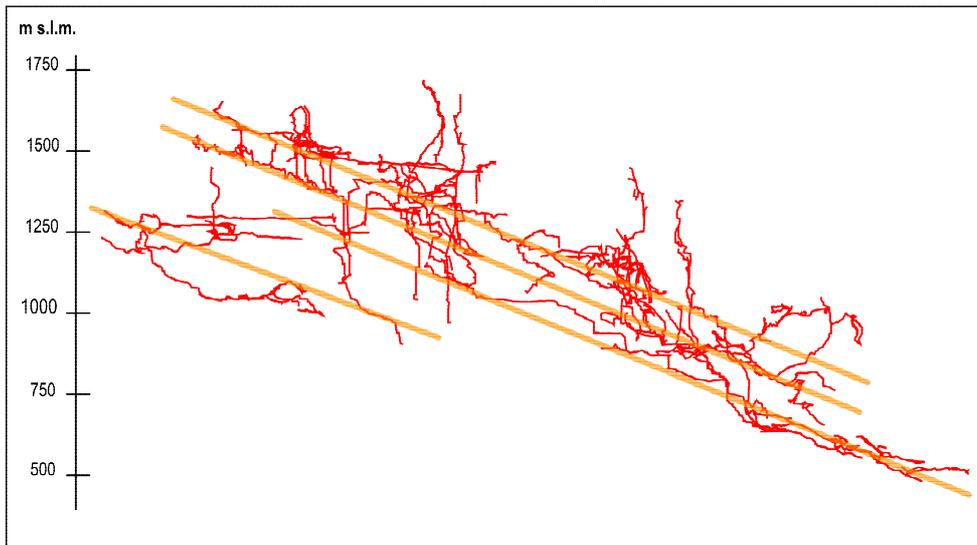


Fig. 6 – Profilo longitudinale proiettato sul piano NW-SE del CCMC con evidenziati i piani strutturali principali.

libero in condizioni di gradiente idraulico abbastanza elevato.

Da questo andamento generale si stacca nettamente il piano orizzontale di gallerie che si sviluppa intorno ai 1200 m di quota nel settore NW del sistema e che si collega ad analoghi piani sviluppati a quote simili in tutto il complesso. Tale piano, come già ipotizzato in precedenti lavori (PICCINI, 1999, 1994, 2011b), segna probabilmente una fase di prolungato stazionamento del livello di base e di “maturazione” del sistema con sviluppo di condotti in prossimità di una superficie piezometrica a basso gradiente e che vede il passaggio da condizioni di alimentazione prevalentemente allogeniche a una alimentazione da acque di prevalente infiltrazione locale.

La sezione proiettata sul piano orientato SW-NE (Fig. 7), mostra invece un disegno piuttosto caotico, poiché tutte le vie di trasferimento verticale finiscono concentrate in uno spazio ristretto. Tale visione mostra però bene lo sviluppo dei principali piani orizzontali, benché visti di taglio, che appaiono chiaramente svincolati dalla struttura, che qui è vista in sezione trasversale grossomodo perpendicolare alla direzione media delle superfici litologiche. Tale proiezione mette bene in evidenza l'esistenza di più di quattro piani epifreatici, alcuni dei quali interessano tutto il sistema, mentre altri solo un settore. Da notare che i livelli epifreatici superiori non sono orizzontali, ma moderatamente inclinati, a indicare un gradiente idraulico elevato, come tipicamente avviene nelle fasi più “giovanili” di sviluppo di un sistema carsico (FORD & WILLIAMS, 2007; AUDRA & PALMER, 2013).

Le figure 6 e 7 mettono dunque in evidenza l'effettiva presenza di superfici lito-strutturali lungo le quali si ha uno sviluppo preferenziale dei condotti, corrispondenti circa al passaggio tra Grezzoni e Marmi e alla superficie assiale della piega. In questo caso però non si può parlare strettamente di “inception horizons” (LOWE, 2000) poiché lo stesso orizzonte viene utilizzato più volte e in fasi diverse, via via che il livello di base si approfondisce in seguito al sollevamento tettonico

dell'area e all'incisione delle valli circostanti.

Per quanto riguarda invece le proiezioni sul piano orizzontale e l'analisi statistica delle direzioni di sviluppo preferenziale di tutto il sistema carsico (vedi Fig. 4), i grafici non mostrano orientamenti nettamente favoriti benché il sistema sia allungato lungo la struttura del Corchia, cioè circa NW-SE.

Una prima considerazione d'ordine generale, che vale per tutto il sistema, è che le direzioni di sviluppo di quelle che erano le antiche reti di drenaggio del Corchia, non sembrano influenzate particolarmente da quella che

doveva essere la posizione delle aree d'emergenza che, per la geometria della struttura geologica, è lecito ritenere fosse sempre stata a S o SE del massiccio carsico.

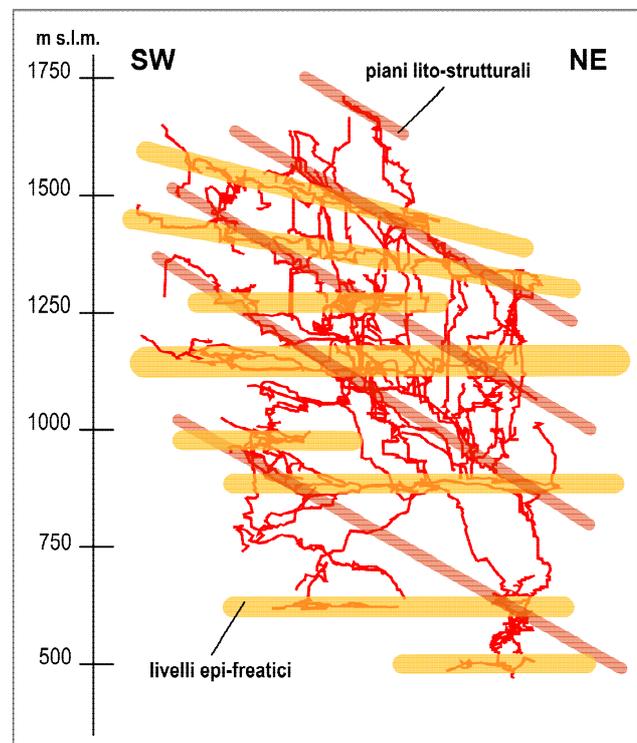


Fig. 7 – Profilo trasversale proiettato sul piano SW-NE del CCMC. Sono indicati i piani lito-strutturali lungo i quali si sviluppano condotte freatiche o forre di approfondimento vadoso e i livelli a sviluppo orizzontale lungo i quali si ha lo sviluppo di condotte epi-freatiche formate in corrispondenza di antiche superfici piezometriche.

CONCLUSIONI

Dall'analisi di questa prima serie di dati si osserva come le direttrici di sviluppo preferenziale non siano le stesse nei quattro livelli altimetrici considerati. Questo significa che l'influenza delle discontinuità non è stata la stessa nel corso delle varie fasi temporali di sviluppo del sistema. Più in dettaglio si nota che le gallerie più alte, e quindi più vecchie, risentono maggiormente delle discontinuità litologiche, mentre quelle più recenti sono impostate preferenzialmente lungo le principali famiglie di fratture. Una possibile spiegazione di tale diverso assetto può essere nel fatto che le gallerie alte si sono formate quando la montagna non era ancora emersa come struttura morfologica. In tale contesto paleo-morfologico l'ammasso roccioso del Corchia doveva essere ancora soggetto a un forte carico litostatico. L'effetto di tale carico poteva essere quello di limitare la permeabilità associata ai sistemi di fratture esistenti. In questa situazione i piani lito-strutturali vedevano esaltato il loro ruolo sulla circolazione sotterranea. Con il sollevamento e l'incisione delle valli, le fratture avrebbero avuto la possibilità di aprirsi per fenomeni di rilascio tensionale diventando perciò vie preferenziali per il flusso delle acque sotterranee, in grado quindi di risentire meno delle superfici litologiche.

Vale la pena sottolineare come quella che appare essere una delle direzioni di maggior sviluppo dei condotti carsici del Corchia e cioè la N-S non trova riscontro in superficie in significativi sistemi di fratture.

RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia la Federazione Speleologica Toscana per il supporto operativo durante le operazioni di rilievo nell'ambito del progetto per il nuovo rilievo del Corchia.

OPERE CITATE

- AUDRA P. & PALMER A.N., 2013 - *The vertical dimension of karst: controls of vertical cave pattern*. In: J Shroder (ed. in Chief), A. Frumkin (ed.), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, Vol. 6: 286-306.
- CARMIGNANI L. & GIGLIA G., 1983 - *Il problema della doppia vergenza delle Alpi Apuane e la struttura del M. Corchia*. Mem. Soc. Geol. Ital., 26: 515-525.
- CARMIGNANI L. & GIGLIA G., 1984 - *"Autoctono Apuano" e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti*. Società Geologica Italiana, vol. Giubilare, Edizioni Pitagora, Bologna: 199-214.
- FALLANI F. & PICCINI L., 1990 - *Pianta generale del Complesso Carsico del Monte Corchia*. Suppl. a *Talp - Rivista della Fed. Spel. Tosc.*: 2.
- FILIPPONI M., JEANNIN P. & TACHER L., 2009 - Evidence of inception horizons in karst conduit net-works. *Geomorphology*, 106: 86-99.
- FISH L., 2010 - *Compass*. www.fountainware.com.
- FORD D. C. & WILLIAMS P. W., 2007 - *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- KLIMCHOUK A.B., 2003 - *Cave morphometry*.- In: Gunn, J. (ed.) *Encyclopedia of cave and karst science*, Fitzroy Dearborn: 1120-1125, New York.
- KLIMCHOUK A.B., FORD D., 2000 - *Lithologic and structural controls of dissolutional cave development*. In: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., Eds., *Speleogenesis - Evolution of Karst Aquifers*, National Speleological Society: 54-64, Huntsville, Alabama, National Speleological Society.
- LOWE D. J., 2000 - *Role of stratigraphic elements in speleogenesis: the speleoinception concept*. In: A.B. Klimchouk, D.C. Ford, A.N. Palmer & W. Dreybrodt, Eds., *Speleogenesis - Evolution of Karst Aquifers*: 65-76, Huntsville, Alabama, National Speleological Society.
- PALMER A. N., 1987 - *Cave levels and their interpretation*. National Speleological Society Bulletin, 49: 50-66.
- PALMER A. N., 1991 - *Origin and morphology of limestone caves*. Geological Society of America Bulletin 103: 1-21.
- PICCINI L., 1991 - *Ipotesi sulla origine e sulla evoluzione del Complesso Carsico del Monte Corchia*. Atti 6° Congr. Federazione Speleologica Toscana: 59-82.
- PICCINI L., 1994 - *Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana - Italia)*. *Natura Bresciana*, Museo Civico di Scienze Naturali Brescia, 30 (1996): 45-85.
- PICCINI L., 1998 - *Evolution of karst in the Alpi Apuane (Italy): Relationships with the morphotectonic history*. *Suppl. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, III-4 (1997): 21-31.
- PICCINI L., 2001 - *L'Analisi morfometrica delle grotte carsiche*. Atti 18° Congr. Nazionale Speleologia: 145-149.
- PICCINI L., 2011a - *Recent developments on morphometric analysis of karst caves*. *Acta Carsologica*, 40: 43-52.
- PICCINI L., 2011b - *Speleogenesis in highly geodynamic contexts: The quaternary evolution of Monte Corchia multi-level karst system (Alpi Apuane, Italy)*. *Geomorphology*, 134: 49-61.
- PICCINI L., ZANCHETTA G., DRYSDALE R., HELLSTROM J., ISOLA I., FALICK A.E., LEONE G., DOVERI M., MUSSI M., MANTELLI F., MOLLI G., LOTTI L., RONCIONI A., REGATTIERI E., MECCHERI M. & VASELLI L., 2008 - *The environmental features of the Monte Corchia cave system (Alpi Apuane, central Italy) and their effects on speleothem growth*. *International Journal of Speleology*, 37: 153-172.
- SAURO F., ZAMPIERI D. & FILIPPONI M., 2013 - *Development of a deep karst system within a transpressional structure of the Dolomites in north-east Italy*. *Geomorphology*, 184: 51-63.

