

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Relazione di Laurea

Studio geomorfologico delle doline nell'altopiano basaltico di Azrou
(Medio Atlante, Marocco)

Relatore:
Prof. Jo De Waele

Candidato:
Sergio Passanante

Correlatore:
Prof. Maria Teresa Melis
(Università di Cagliari)

Sessione Dicembre 2018
Anno Accademico 2018-2019

Indice

1. Introduzione	Pag. 3
2. Area di studio	Pag. 5
2.1. Inquadramento geografico	Pag. 5
2.2. Inquadramento geologico	Pag. 6
2.3. Clima	Pag.9
3. Metodi	Pag.10
3.1. Rilevamento cartografico	Pag. 11
3.2. Rilevamento sul terreno	Pag. 12
4. Risultati	Pag. 13
4.1. Distribuzione delle doline	Pag. 13
4.2. Morfologia delle doline	Pag. 14
4.3. Morfometria delle doline	Pag. 16
5. Discussione	Pag. 18
5.1. Genesi e morfologia delle doline in rocce solubili	Pag. 18
5.2. Ipotesi genetiche delle doline di Azrou	Pag. 21
6. Conclusioni	Pag. 22
Bibliografia	Pag. 24
Ringraziamenti	Pag. 26

1. Introduzione

Lo studio geomorfologico dell'area di Azrou, nel Medio Atlante (Marocco Centrale) è stato condotto con lo scopo di comprendere la morfologia del paesaggio e risalire alle cause genetiche della formazione delle particolari doline che lo caratterizzano; esse, sono infatti uniche nel loro genere, essendo situate in colate di lava basaltica.

La ricerca è stata svolta inizialmente attraverso un rilevamento di tipo cartografico, in ambiente GIS e di immagini satellitari (lavoro svolto presso l'Università degli Studi di Cagliari) e successivamente con una campagna di rilevamento sul terreno, che ha permesso di approfondire il lavoro svolto in telerilevamento, integrandolo con le coordinate GPS di ogni dolina e con misurazioni e osservazioni più dettagliate.

Già a partire dai primi anni del '90 e ancor più durante gli ultimi anni, si è sviluppato un notevole interesse scientifico per le cavità carsiche e i paesaggi carsici che ne derivano (Fig. 1).

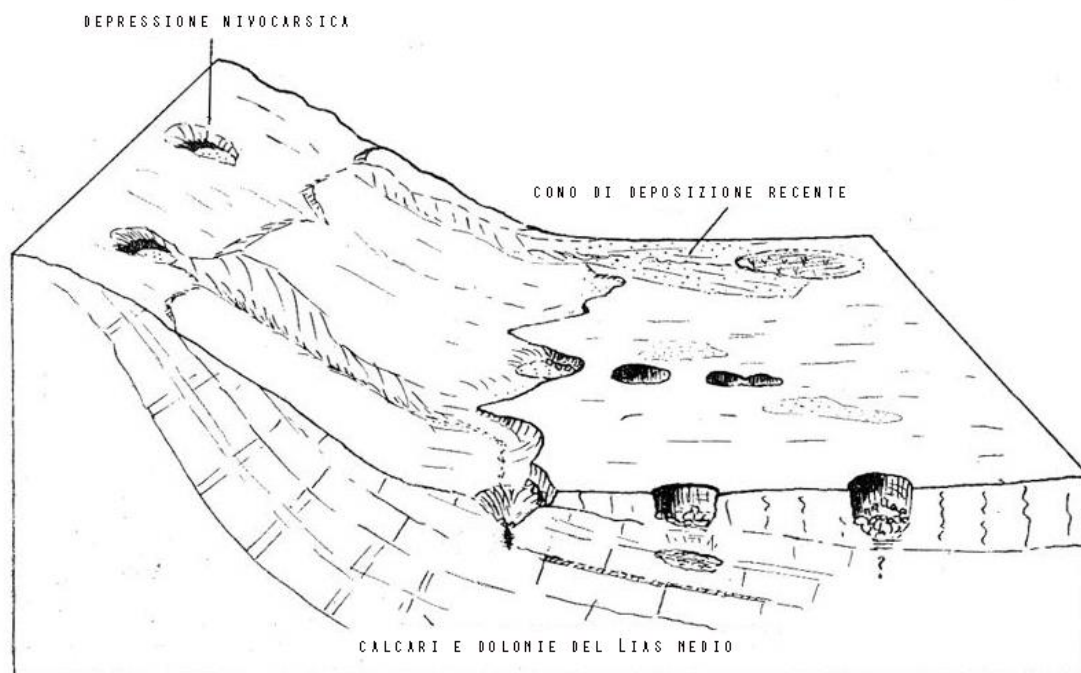


Figura 1. Schema rappresentativo di un paesaggio carsico (Immagine modificata da Martin, 1981).

Questo tipo di paesaggio può essere definito come un insieme di forme anomale rispetto ai tipici paesaggi fluviali; queste forme sono determinate dalla solubilità della roccia, spesso calcarea, nelle acque naturali. Le acque tendono a penetrare all'interno delle masse rocciose, generando delle vie di circolazione sotterranea; da ciò deriva una scarsa o assente idrografia superficiale. I presupposti per la formazione di paesaggi carsici sono la presenza di rocce solubili e l'abbondanza di precipitazioni meteoriche (Sauro, 1979).

I processi carsici interessano prima la superficie esterna, partendo dalle zone di debolezza della massa rocciosa (piani di fratturazione e di stratificazione) in cui l'acqua può penetrare, generando conche chiuse, pozzi, gallerie, inghiottitoi e cavità. Il paesaggio carsico spicca soprattutto per l'eccezionale abbondanza di cavità sotterranee, che lo rendono complesso da esplorare nella sua totalità (Fig. 2) (Martin, 1981).

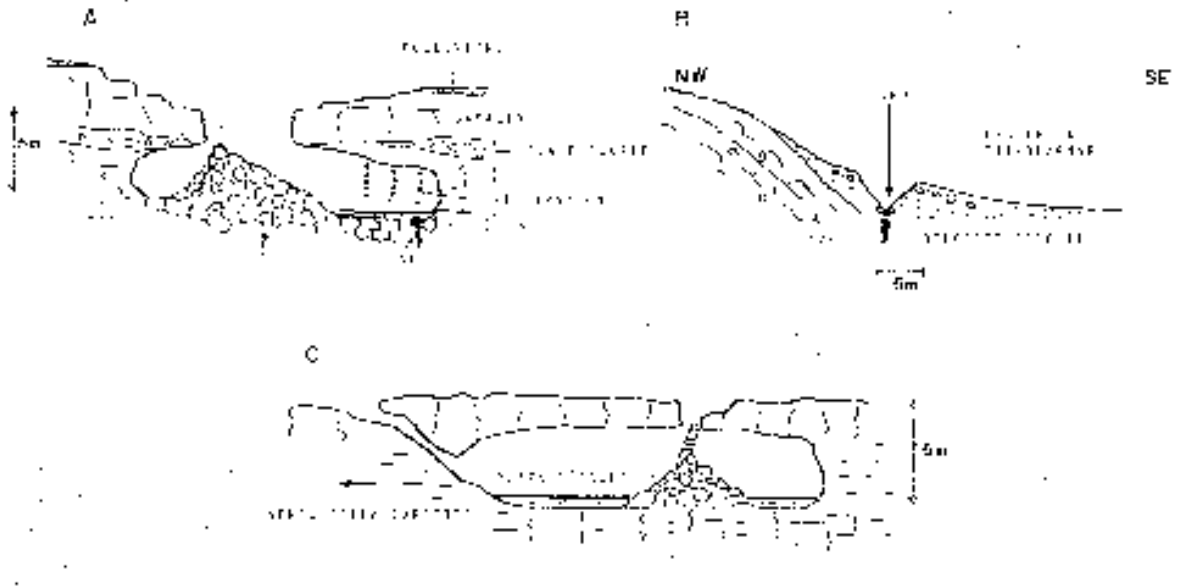


Figura 2. Esempi di cavità sotterranee: A e C - grotte sotterranee; B - foro di assorbimento. (Immagine modificata da Martin, 1981).

Le rocce solubili si dividono in carbonatiche ed evaporiti, ma prevalgono notevolmente le rocce carbonatiche (calcari e dolomie), i cui principali componenti sono il carbonato di calcio (CaCO_3) e il carbonato di magnesio (MgCO_3); questi composti possono presentarsi isolati in vari stati cristallini (calcite o aragonite) o combinati, formando un sale doppio (dolomite).

Nelle acque naturali spesso si trovano in soluzione grandi quantità di carbonato di calcio, dovuto alla presenza di anidride carbonica (CO_2), che proviene dall'atmosfera e conferisce alle acque un certo grado di acidità; per questo motivo l'acqua è in grado di provocare la corrosione delle rocce carbonatiche (Sauro, 1979).

La reazione che identifica il processo di corrosione del calcare è la seguente:



anidride carbonica + acqua + carbonato di calcio \leftrightarrow bicarbonato di calcio

La quantità di CaCO_3 che l'acqua può disciogliere sotto forma di bicarbonato di calcio dipende dalla quantità di CO_2 presente nell'acqua, che a sua volta dipende dalla CO_2 dell'aria.

Per definire e confrontare le diverse situazioni si considerano i seguenti parametri (Sauro, 1979):

- acidità, espressa in pH;
- durezza della soluzione, ovvero la concentrazione di CaCO_3 disciolto;
- anidride carbonica disciolta in mg/litro;
- la temperatura della soluzione.

In natura l'azione corrosiva di una soluzione si ha quando, raffreddando una soluzione satura, la si rende aggressiva; viceversa, riscaldando la soluzione, la si rende soprassatura e si provoca la precipitazione di CaCO_3 (Gams, 1965).

2. Area di studio

Uno dei paesi più interessanti dal punto di vista dei geomorfositi è il Marocco. Infatti, esso presenta una geologia molto ricca, in particolare il Nord è caratterizzato da una straordinaria successione geologica con rocce di tutti i tipi (igne, sedimentarie, metamorfiche) che possono essere datate dal Precambriano all'Olocene. Una delle zone più interessanti è il Medio Atlante ed in particolare la zona di Ifrane - Azrou (De Waele et al., 2009).

2.1. Inquadramento geografico



Figura 3. Ubicazione dell'area di studio. (Immagine da De Waele et al., 2009).

Il Medio Atlante è una catena montuosa che si estende in direzione SO - NE fra la zona atlantica del Marocco ad Ovest e le pianure del Moulouya a Est, formando una barriera fisica che separa le regioni atlantiche dalla parte orientale; nella parte meridionale è delimitato dalle montagne dell'Alto Atlante, mentre nella parte settentrionale si estendono le montagne del Rif.

Dal punto di vista della geomorfologia il Medio Atlante può essere diviso in due grandi settori: le zone settentrionale e occidentale sono chiamate “Medio Atlante Causses”, mentre le zone meridionale e orientale sono dette “Medio Atlante Piegato”.

Il Medio Atlante Causses è caratterizzato da una serie di altopiani calcarei, più o meno tagliati da valli, con altitudini che variano fra i 1.800 m s.l.m (Oum Er Rbia) e i 1.000 m s.l.m. (El Hajeb); il Medio Atlante Piegato è invece caratterizzato da sinclinali, più o meno ampie, delimitate da creste che possono raggiungere i 2.700 m di altitudine (Jbel Tichoukt).

L'area di studio (Fig. 3) è situata quasi interamente nel Medio Atlante Causses, a sud delle città imperiali di Fès e Meknès, nelle vicinanze dei villaggi di Ifrane, Timahdite e principalmente Azrou (De Waele et al., 2009).

2.2. Inquadramento geologico

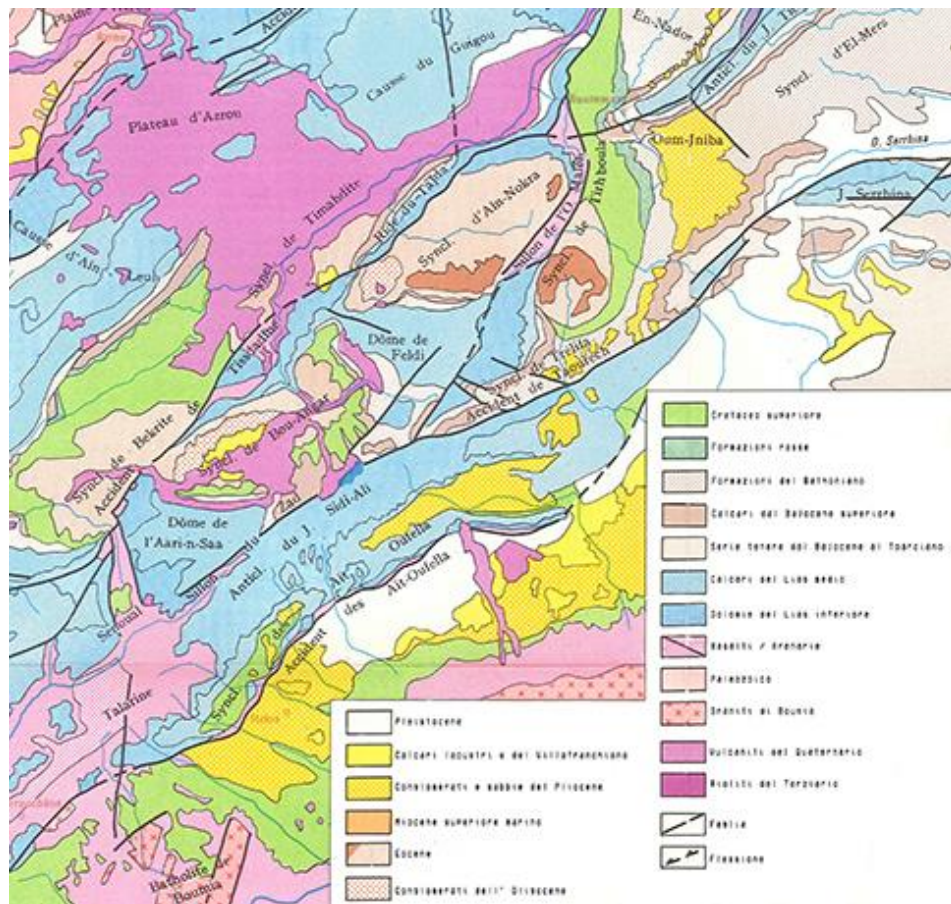


Figura 4. Carta geologica dell'area di studio. (Carta modificata da Martin, 1981).

Lo stato attuale delle conoscenze geologiche del Medio Atlante permette di stabilire una stratigrafia precisa del Giurassico, soprattutto per quanto riguarda il Giurassico Inferiore, ovvero il Lias.

La zona, da un punto di vista geologico (Fig. 4), comprende le rocce di origine metamorfica, sedimentaria e vulcanica che coprono un intervallo di tempo che va dal Siluriano all'Olocene (Martin, 1981; Michard, 1976; Piqué, 1994).

Le rocce più antiche della zona si trovano in un vasto territorio situato ad Ovest della strada che unisce El Hajeb e Azrou e nel complesso possono essere considerate una finestra di erosione.

Questo interessante panorama di rocce del Paleozoico è caratterizzato da un'alternanza di rocce dure (marmi e arenarie) e meno dure (filladi e shales) intensamente piegate in direzione NE - SO e con un'età compresa fra l'Ordoviciano e il Permiano. Il controllo strutturale è visibile nel paesaggio, con lunghe e rettilinee creste ed un sistema di drenaggio dendritico, che da luogo a valli la cui direzione principale è NE - SO (AA. VV., 1975).

I primi sedimenti depositatesi sopra questo basamento paleozoico sono le arenarie del Triassico e le argille rosse, seguite dai basalti alterati, che possono essere tracciati lungo tutto il margine occidentale del Causses (Piqué & Laville, 1993). Questi affioramenti sono facilmente riconoscibili dai loro colori, dal rosso delle argille al marrone scuro dei basalti alterati; le superfici sono erose dal sistema di drenaggio e formano cavità che portano alla luce le rocce Paleozoiche sottostanti (Martin, 1981).

Il più importante tipo di roccia che caratterizza l'area di studio (oltre il 50%) è rappresentato dalle rocce carbonatiche del Causses (altopiano calcareo), che risalgono al Giurassico; esse sono composte da dolomie, dolomie calcaree e calcari, depositatesi in mari più o meno profondi nel periodo compreso fra il Sinemuriano e il Batoniano (Colo, 1964; Martin, 1981).

I primi sedimenti post-giurassici sono composti da marne e argille rosse con intercalazioni di conglomerati del Cenomaniano. A seguire si trovano i calcari marnosi del Cretaceo superiore e successivamente le arenarie, i gessi e le argilliti del Paleocene, per finire poi con i calcari fossiliferi dell'Eocene, che formano una piattaforma vicino al villaggio di Timahdite (Rahhali, 1970). La sequenza sedimentaria dell'area di studio finisce con le sabbie, i conglomerati e i calcari lacustri plio-quadernari che ricoprono gli altopiani e i travertini che affiorano lungo il bordo del Causses.

Un'importante fase vulcanica di tipo alcalino nel Pleistocene ha dato luogo ad una distesa di basalto di oltre 400 chilometri quadrati, con presenza di coni e caldere nel Plateau di Azrou (Harmand & Cantagrel, 1984; Harmand & Moukadiri, 1986).

L'espressione Plateau d'Azrou (Fig. 5) è più adatta rispetto a quella di Causses d'Azrou in quanto la struttura è caratterizzata dalla diffusione del basalto quadernario; tuttavia, tenendo conto dell'organizzazione strutturale delle regioni circostanti, così come degli affioramenti di Lias che emergono dagli strati basaltici, è certo che abbiamo a che fare con la struttura caratteristica dei Causses. Il substrato del Plateau d'Azrou, in base a ciò che si può osservare e dedurre, corrisponde ad una struttura di blocchi con faglie e ondulazioni superficiali; quindi, questa unità può essere considerata una zona di transizione tra la struttura del Causses di Guigou e quella del Causses di Ain - Leuh.

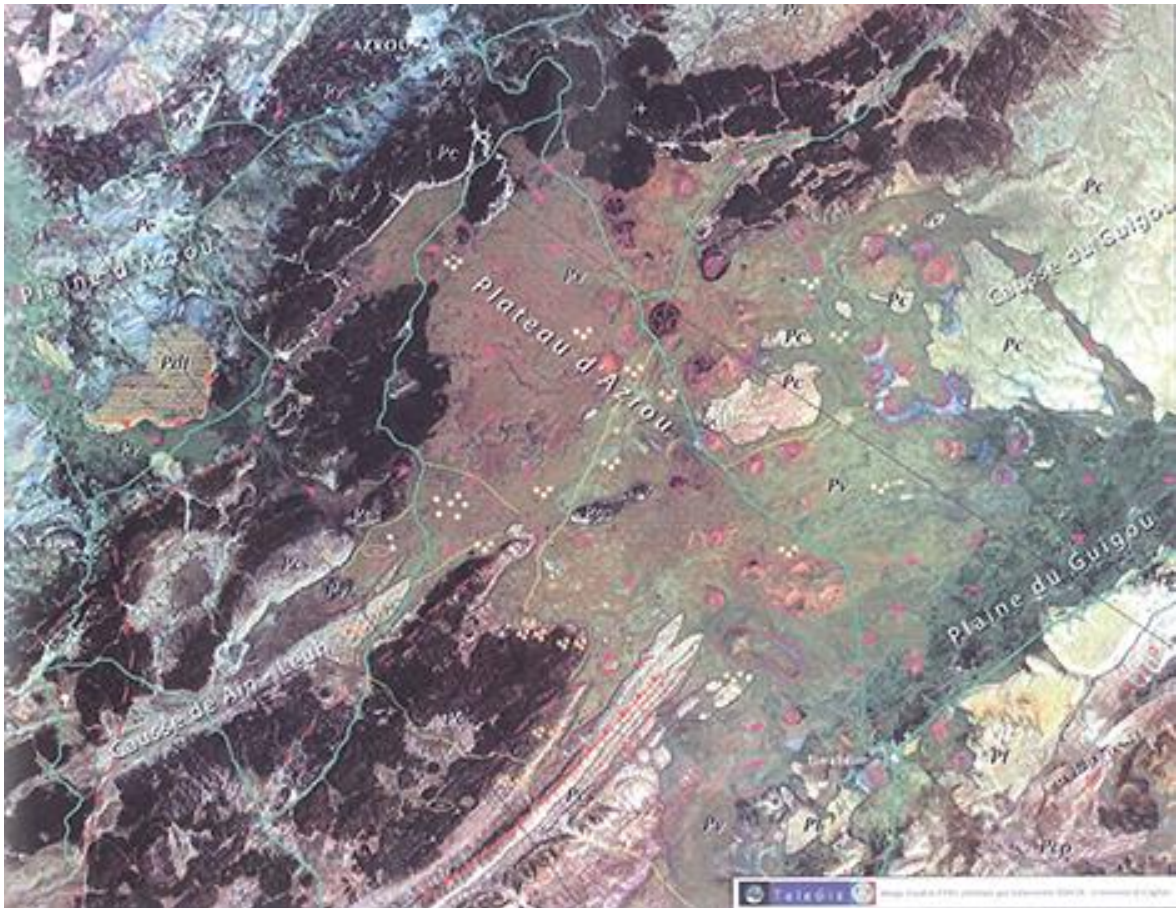


Figura 5. *Altopiano basaltico di Azrou. (Immagine modificata da De Waele et al., 2009).*

Durante il Miocene Medio i processi di corrosione carsica continentale raggiunsero una certa intensità e all'inizio del Pliocene iniziarono a costruire i paesaggi attuali, con il lento sollevamento dei Causses e la formazione delle scarpate tettoniche del Nord e dell'Ovest; la prima divide chiaramente la pianura del Saiss e il Rif dai Causses del Medio Atlante mentre la seconda separa i Causses dagli affioramenti paleozoici (Beaudet & Martin, 1967).

La presenza di importanti depositi di travertini nella pianura del Saiss e lungo il margine nord-occidentale dei Causses testimoniano l'importante corrosione carsica dei calcari del Lias durante questo periodo.

Lo stravolgimento di questo paesaggio durante il Quaternario, dovuto all'attività vulcanica che ha dato origine a diversi edifici, è caratteristica del Plateau di Azrou, in cui le morfologie vulcaniche appaiono inalterate; esse comprendono le colate laviche, i tunnel di lava, le caldere e i crateri di esplosione (Martin, 1981).

L'attuale panorama dei Causses presenta un'abbondanza di morfologie carsiche più o meno attive, principalmente presenti su affioramenti di calcari a diverse altitudini. Molte delle più grandi morfologie, come le macrodoline, sono relazionate ad un'intensa fase carsica del Miocene-Pliocene e oggi sono quasi completamente inattive; generalmente sono collocate in aree strutturalmente favorevoli alla loro formazione, come intersezioni di faglie o sinclinali. Alcune di esse hanno contenuto dei laghi temporanei a causa della presenza di sorgenti d'acqua e la mancanza di inghiottitoi (Bögli, 1971).

Le grandi macrodoline (Fig. 6) sono causate da collassi strutturali dei calcari del Lias e non sempre sono relazionate con la presenza di faglie; la loro origine è molto probabilmente dovuta ad eventi di dissoluzione avvenuti durante il Trias (El Khalki & Akdim, 2001; Martin, 1981).

Nonostante il carsismo superficiale sia molto sviluppato, sono conosciute solo poche grotte nelle montagne del Medio Atlante; ciò è dovuto alla scarsità di strati calcarei puri, infatti, essi sono spesso intercalati da rocce calcaree marnose e sono abbondantemente fratturati, permettendo così il passaggio delle acque superficiali (Martin, 1981).



Figura 6. Schema geomorfologico dell'altopiano basaltico di Azrou. (Immagine modificata da Martin, 1981).

2.3. Clima

Il clima del Medio Atlante Causses è di tipo mediterraneo ed è caratterizzato da inverni e primavere piovosi, seguiti da un lungo periodo di siccità, con intense precipitazioni solo durante le tempeste di fine estate. Le precipitazioni annue medie superano i 900 mm e la temperatura media annua è di circa 12°C, con una notevole escursione termica fra l'inverno e l'estate. La neve è presente stagionalmente oltre i 1.500 metri di altitudine (De Waele et al., 2009).

Il Medio Atlante centrale è costituito da un insieme di altopiani con precipitazioni maggiori rispetto alle pianure vicine; infatti, la scarpata di Azrou costituisce una sorta di

barriera orogenica e favorisce un aumento delle precipitazioni, che superano i 1.000 mm nel Causses di Ifrane e in una parte del Plateau di Azrou (Fig. 7) (Martin, 1981).

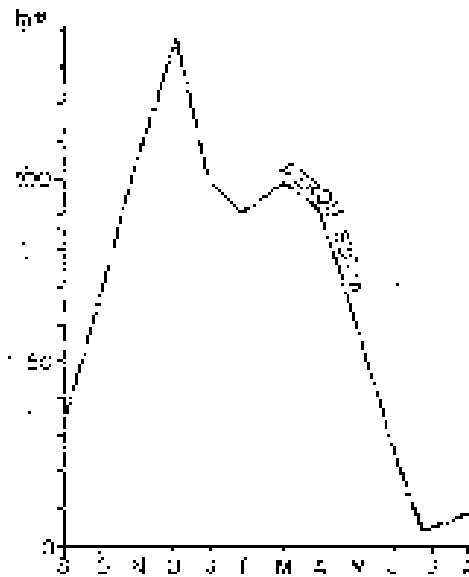


Figura 7. *Precipitazioni annue nell’altopiano basaltico di Azrou. (Immagine modificata da Martin, 1981).*

Gli elementi del clima che maggiormente influenzano il processo carsico sono la disponibilità d’acqua (principalmente la piovosità) e la temperatura; infatti, gli equilibri della reazione di dissoluzione, nella quale l’acqua entra a far parte come elemento indispensabile, dipendono dalla temperatura (Sauro, 1979).

Nei climi temperato-freddi la reazione chimica di dissoluzione è lenta, ma la soluzione è concentrata e stabile per l’alta solubilità del CO₂ in acqua; pur essendo lenta la corrosione superficiale, data la stabilità delle soluzioni il processo risulta favorevole all’allargamento delle fessure profonde e alla percolazione dell’acqua all’interno dei massicci.

Nei climi caldo-umidi la reazione è veloce ma la soluzione instabile; ciò determina la tendenza alla corrosione veloce delle superfici rocciose esposte ma anche la riprecipitazione rapida del carbonato di calcio nelle fessure, fatto che limita la carsogenesi più profonda (Gèze, 1965).

3. Metodi

La metodologia adottata si basa sulla consultazione preliminare della letteratura scientifica e geografica e di mappe topografiche e geologiche; di enorme valore è stato il lavoro di Tesi di Dottorato di Jacques Martin, presentato nel 1977 all’Università di Parigi VII (Martin, 1981).

Dopo un lavoro di rilevamento cartografico svolto in ambiente GIS, in collaborazione con l’Università di Cagliari, è stata organizzata una campagna di studio del sito per raccogliere

i dati morfometrici sulle doline, verificare i perimetri estratti da fotointerpretazione e fare osservazioni più dettagliate.

3.1. Rilevamento cartografico

Lo studio della regione di Azrou è stato effettuato inizialmente usando differenti tipi di mappe tematiche (topografica, geologica, geomorfologica) e successivamente interpretando fotografie aeree e immagini satellitari, utilizzando QGis.

Dalle immagini satellitari è stato possibile riconoscere e cartografare le principali forme, in modo da poter pianificare il lavoro di campagna. Dove la copertura vegetale era rada, è stato inoltre possibile osservare le diverse litologie e i lineamenti più importanti.

Il lavoro si è centrato principalmente sull'individuazione di doline, o meglio di morfologie concave verosimilmente associabili a doline, in modo da poter avere un'idea generale della loro distribuzione.

Alcuni dei dati elaborati dalle immagini telerilevate sono riportati in un'immagine satellitare, in cui sono indicate le morfologie concave, classificate per colore: quelle verdi rappresentano le morfologie individuate tramite rilevamento cartografico, mentre quelle blu rappresentano quelle morfologie, individuate tramite rilevamento cartografico, che sono poi state confermate come doline dal rilevamento sul terreno (Fig. 8).

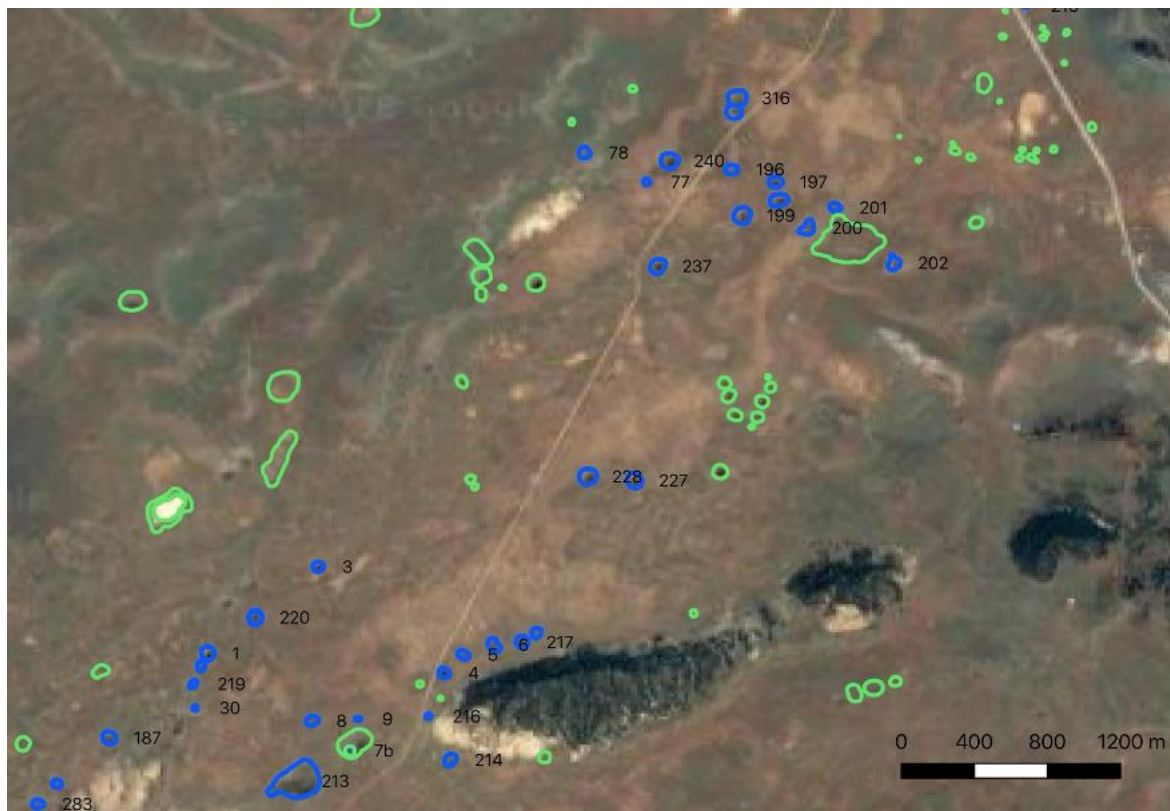


Figura 8. Immagine satellitare rappresentativa delle morfologie concave individuate tramite rilevamento cartografico (in verde) e delle morfologie concave individuate tramite rilevamento cartografico e poi confermate come doline dal rilevamento sul terreno (in blu).

3.2. Rilevamento sul terreno

Lo studio geomorfologico della regione è stato seguito da una campagna di rilevamento sul terreno, durante la quale alcune morfologie, quali depressioni o crateri, precedentemente associate a doline sono state rimosse dalla carta, in quanto sul campo si sono rivelate di altra natura; al contrario, molte doline precedentemente ignorate sono state aggiunte e studiate in dettaglio.

Di seguito si riporta un'immagine satellitare, in cui sono indicate in blu le morfologie individuate tramite rilevamento cartografico e poi confermate come doline dal rilevamento sul terreno e in rosso tutte le morfologie inizialmente ignorate dal rilevamento cartografico ma viste sul terreno e classificate indubbiamente come doline (Fig. 9).

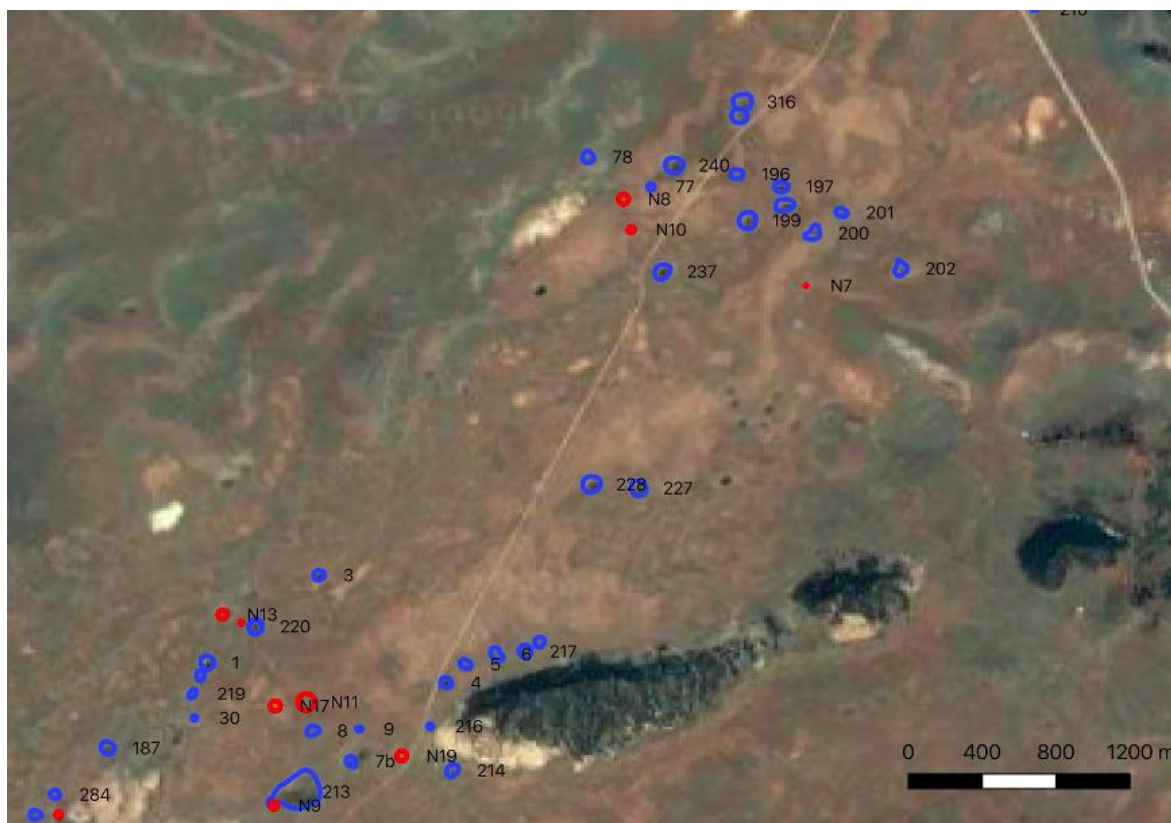


Figura 9. Immagine satellitare rappresentativa delle morfologie concave individuate tramite rilevamento cartografico e poi confermate come doline dal rilevamento sul terreno (in blu) e le morfologie ignorate dal rilevamento cartografico ma viste sul terreno e classificate come doline (in rosso).

Per la descrizione delle doline osservate direttamente sul terreno sono stati raccolti una serie di dati, quali le coordinate geografiche, l'altitudine, e la distanza fra il bordo e il centro della dolina (misurazioni effettuate con telemetro) e l'angolo tra l'orizzontale e la retta congiungente l'operatore con il centro della dolina; inoltre, si è preso nota di informazioni riguardanti la visibilità, la geologia, la geomorfologia, la presenza o meno di vegetazione e l'utilizzo antropico se presente.

4. Risultati

Attraverso il lavoro di rilevamento cartografico in ambiente GIS si sono individuate molte morfologie concave, verosimilmente classificabili come doline. Tuttavia, non potendo considerare certe queste informazioni, è stata necessaria una campagna di rilevamento sul terreno per verificare la natura di tali depressioni. In campagna il lavoro di telerilevamento è stato perfezionato permettendo, non solo di confermare la presenza di una presunta dolina, ma anche di aggiungerne di nuove, non rilevate in telerilevamento, e di eliminarne alcune che in realtà erano solo delle semplici depressioni.

4.1. Distribuzione delle doline

Le doline sono abbondanti nelle superfici poco inclinate degli altopiani carsici; la loro densità è molto variabile, da poche unità a parecchie decine per chilometro quadrato. La disposizione risulta in genere irregolare ma spesso, con un'attenta lettura delle carte, è possibile riconoscere degli allineamenti che corrispondono a sistemi di fratture o alla direzione di piccole valli secche (Sauro, 1979).

L'immagine satellitare riportata di seguito (Fig. 10) mostra tutte le morfologie concave rilevate in questo studio; vengono divise in: morfologie concave individuate in telerilevamento, indicate in verde; doline rilevate direttamente sul terreno, indicate in rosso; morfologie concave individuate in telerilevamento e successivamente confermate come doline sul terreno, indicate in blu.

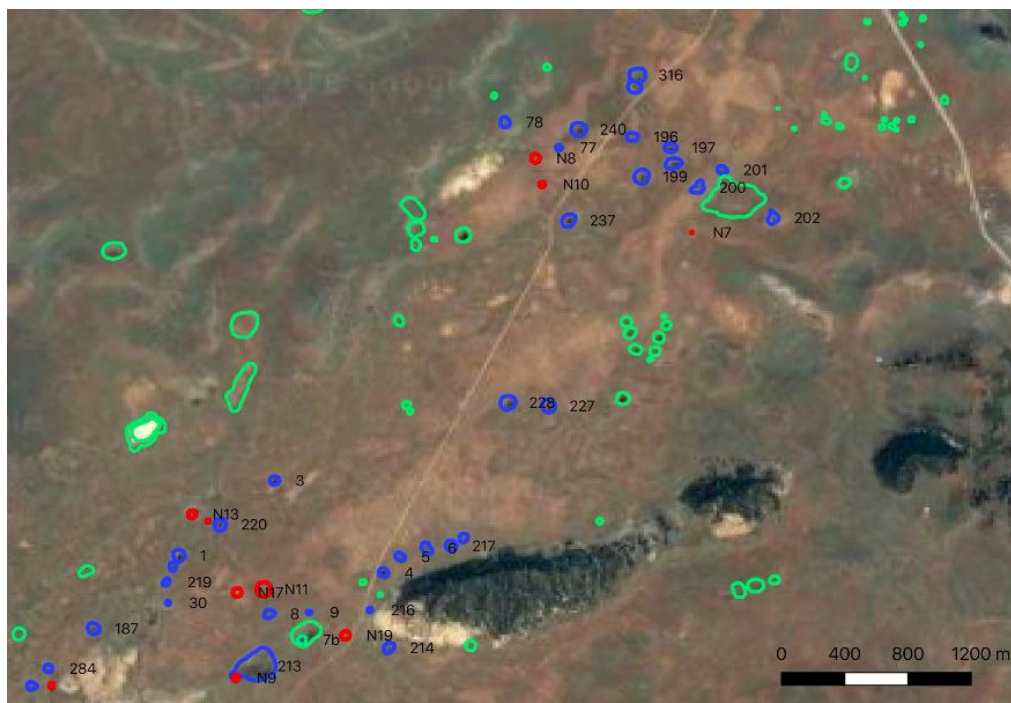


Figura 10. Immagine satellitare rappresentativa delle morfologie concave individuate in telerilevamento (in verde), doline rilevate direttamente sul terreno (in rosso) e morfologie concave individuate in telerilevamento e successivamente confermate come doline sul terreno (in blu).

4.2. Morfologia delle doline

Attraverso il rilevamento sul terreno è stato possibile notare che le doline si presentano sotto varie morfologie, notevolmente distinte fra loro per forma e profondità. Per rendere più agevole il loro studio sono state classificate in 5 tipologie: a piatto, a scodella, a pozzo, a imbuto, a imbuto “inclinato” (Fig. 11a, 11b, 11c, 11d, 11e).



Figura 11a. *Dolina a piatto.*

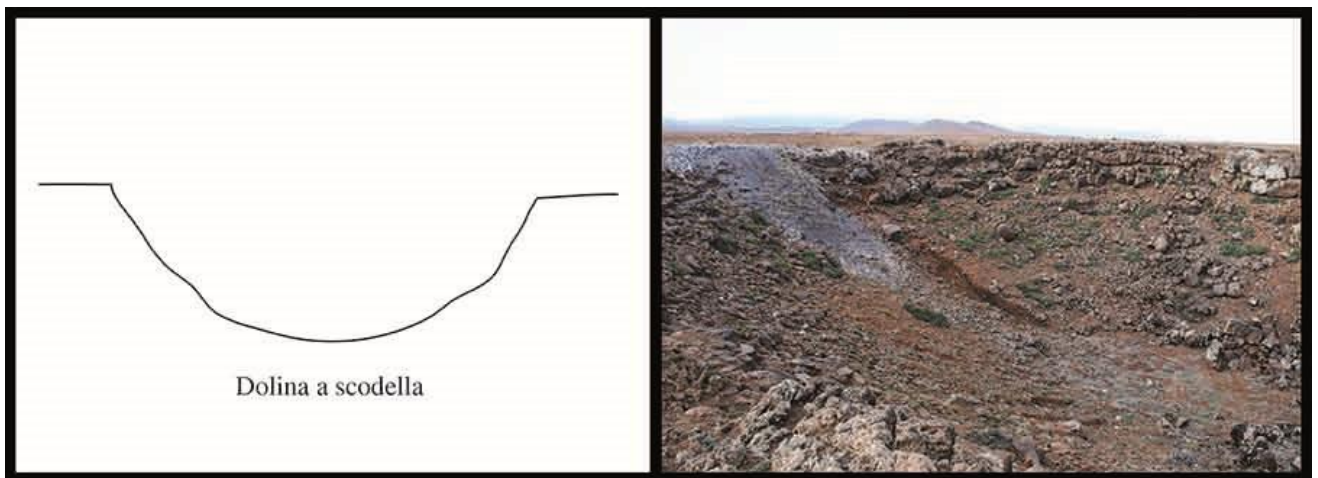


Figura 11b. *Dolina a scodella.*

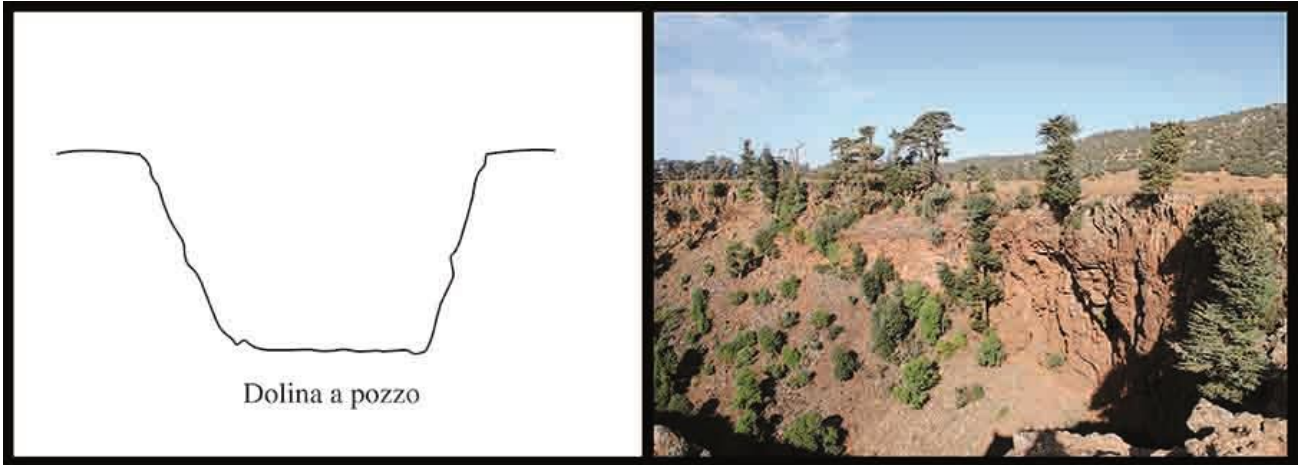


Figura 11c. *Dolina a pozzo.*

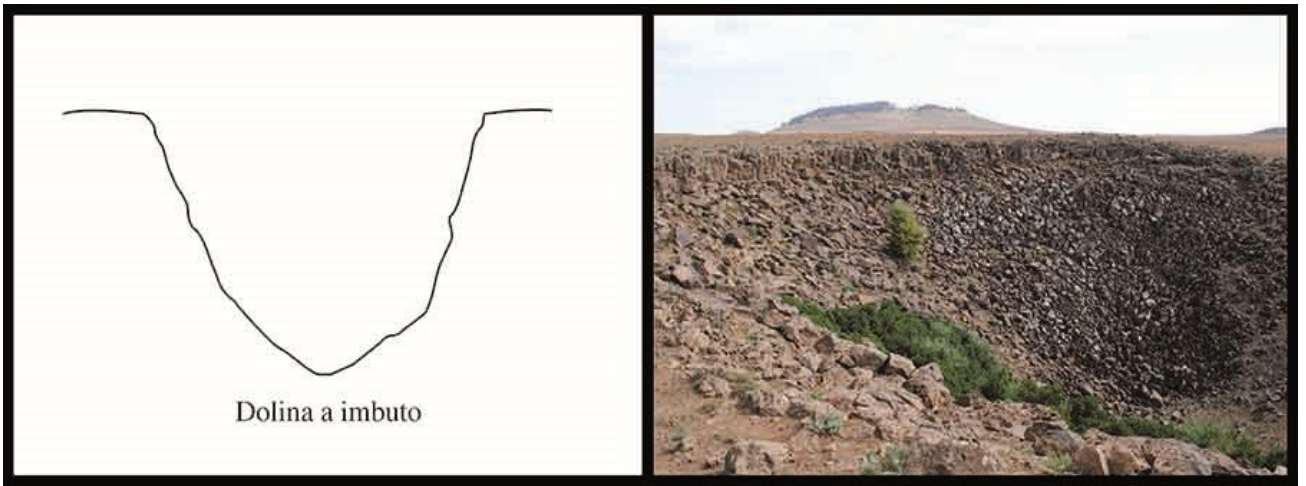


Figura 11d. *Dolina a imbuto.*

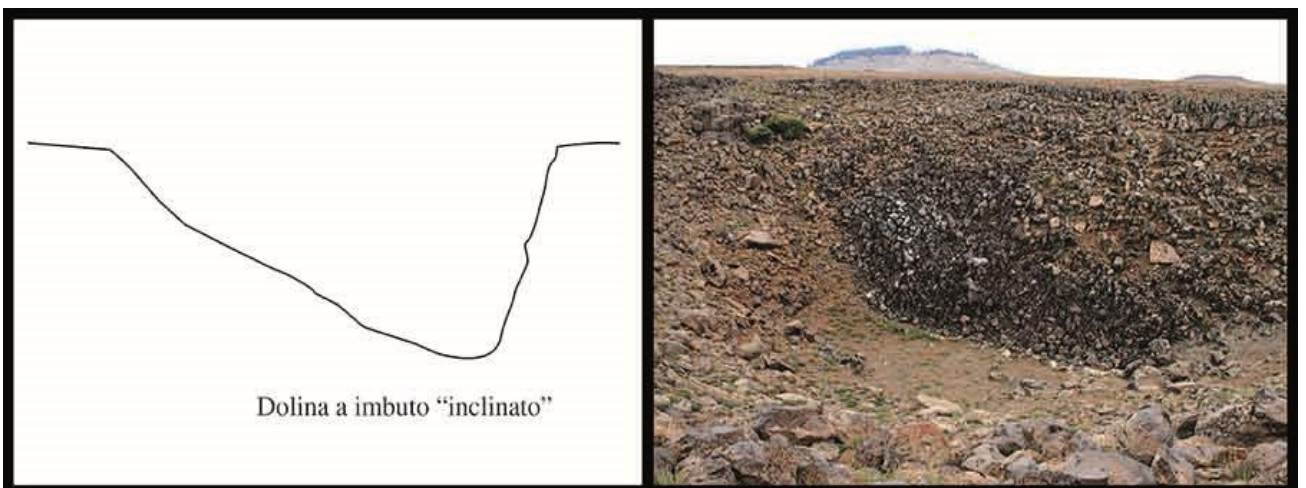


Figura 11e. *Dolina a imbuto "inclinato".*

Il diagramma sottostante (Fig. 12) mostra le percentuali stimate delle doline presenti nel Plateau di Azrou basandosi su quelle osservate direttamente sul terreno; la percentuale maggiore è rappresentata dalle doline a piatto, seguite da quelle ad imbuto e ad imbuto “inclinato”.

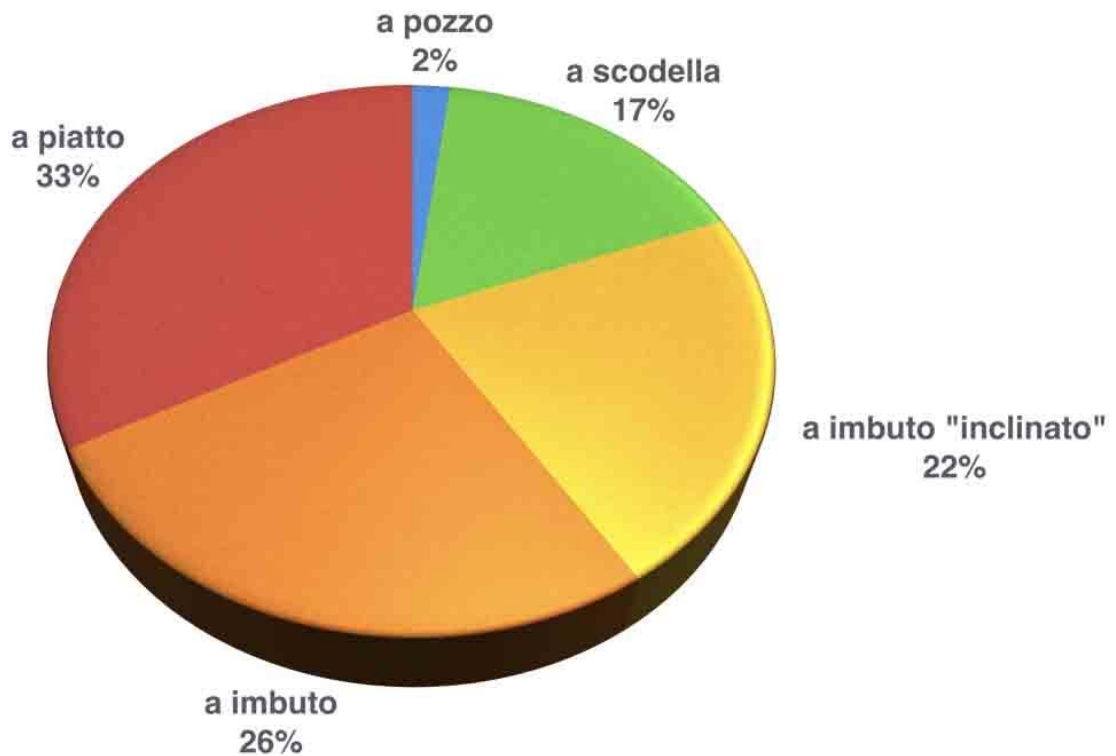


Figura 12. Diagramma rappresentativo delle percentuali stimate delle doline presenti nel Plateau di Azrou.

4.3. Morfometria delle doline

Tutti i valori misurati in campagna nel Plateau di Azrou sono stati riassunti in una tabella (Fig. 13); qui le doline vengono catalogate con un codice, preceduto dalla lettera N nei casi in cui si riferisce a doline “nuove”, ovvero rilevate direttamente sul terreno; i codici doppi o seguiti dalla lettera “b” sono invece riferiti a doline coalescenti.

CODICE	COORDINATE GEOGRAFICHE CENTROIDE	PROFONDITA' [m]	AREA [m ²]	PERIMETRO [m]	CLASSIFICAZIONE
1	Point (-5.18621388 33.3067066)	32,78497906	5306,283	258,2261001	a imbuto "inclinato"
2	Point (-5.18661255 33.3059641)	32,72870216	2324,822	170,9227161	a imbuto "inclinato"
3	Point (-5.17971579 33.31179923)	23,15992061	3211,853	200,901307	a imbuto "inclinato"
4	Point (-5.17231918 33.30555119)	39,52126496	3268,392	202,6618494	a scodella
5	Point (-5.17118763 33.30661943)	6,230833131	2923,095	191,6577552	a scodella
6	Point (-5.16937838 33.30720408)	11,56093208	4307,245	232,6508908	a piatto
7a	Point (-5.17786529 33.30099189)	26,67685385	2611,043	181,1389909	a imbuto "inclinato"
7b	Point (-5.17769678 33.30073664)	44,5211211	377,319	68,85877136	a imbuto
8	Point (-5.18007128 33.30274945)	38,12792252	3392,225	206,4653883	a piatto
9	Point (-5.17737533 33.3028545)	9,264622507	706,577	94,22902127	a piatto
12	Point (-5.09809656 33.37409004)	91,5605617	6777,12	291,828377	a imbuto
14	Point (-5.09627015 33.29331329)	2,382331502	14316,692	424,1566428	a piatto
17	Point (-5.11492007 33.37594871)	9,374253581	20633,006	509,197408	a scodella
19	Point (-5.08125352 33.35599477)	26,78770154	612,462	87,72926809	a scodella
30	Point (-5.18695469 33.30350314)	35,13953682	738,723	96,34867409	a pozzo
34	Point (-5.22508769 33.30305727)	8,991836059	11694,619	383,3522095	a imbuto
35	Point (-5.22186153 33.30413902)	30,9996964	28156,653	594,8335371	a imbuto
36	Point (-5.22380699 33.30739566)	13,69417876	2366,476	172,4471353	a imbuto
37	Point (-5.227751 33.3071606)	42,08054085	2154,99	164,5612439	a imbuto "inclinato"
39	Point (-5.22892427 33.30631634)	29,28294735	2676,996	183,412442	a imbuto
43	Point (-5.15527247 33.33850879)	17,95269666	6004,544	274,6913273	a imbuto
48	Point (-5.08035197 33.3577653)	67,12469923	34592,628	659,3206989	a scodella
77	Point (-5.16040968 33.33439175)	17,95269666	1254,413	125,5524538	a imbuto
78	Point (-5.16406682 33.336116)	25,36122577	3698,691	215,5901711	a scodella
104	Point (-5.12038179 33.3207706)	51,37764445	1731,87	147,5239651	a scodella
105	Point (-5.11742837 33.31837419)	9,212906133	1829,872	151,640528	a piatto
174	Point (-5.22006117 33.30153115)	67,12469923	8486,418	326,5631237	a imbuto
175	Point (-5.21318779 33.30524724)	39,62429423	4437,937	236,1541046	a imbuto
176	Point (-5.21281336 33.30920762)	0,416011537	9228,177	340,5358899	a imbuto "inclinato"
177	Point (-5.21624551 33.30680614)	48,57564207	9250,137	340,9408303	a scodella
178	Point (-5.21530025 33.30449149)	37,58802007	6744,603	291,1274308	a imbuto
179	Point (-5.21826162 33.30741724)	13,04021746	12553,615	397,1817955	a imbuto
180	Point (-5.21073506 33.30352012)	20,20188227	5284,182	257,687775	a imbuto "inclinato"
181-2	Point (-5.20939693 33.30504238)	19,04073888	61636,303	880,0821705	a pozzo
183-1	Point (-5.20852004 33.30422367)	26,68954577	8709,391	330,8253847	a imbuto "inclinato"
184	Point (-5.20471119 33.29668718)	40,80158332	11354,546	377,7372542	a imbuto "inclinato"
186	Point (-5.19849157 33.29244119)	25,92698732	4203,094	229,8208801	a imbuto "inclinato"
187	Point (-5.19200266 33.30174539)	31,72611723	5069,557	252,400341	a imbuto
189	Point (-5.20514234 33.30255017)	14,89981836	8173,453	320,4850068	a imbuto
190	Point (-5.21031864 33.30125353)	54,3826165	5879,681	271,8202541	a piatto
196	Point (-5.15541301 33.33512544)	54,51342792	3551,221	211,2485721	a imbuto "inclinato"
197	Point (-5.15282343 33.3343904)	5,845211177	4212,97	230,0907265	a imbuto "inclinato"
198	Point (-5.15262322 33.33332409)	35,38590935	6389,702	283,3643652	a piatto
199	Point (-5.15478187 33.33242336)	39,62429423	8065,281	318,3572053	a piatto
200	Point (-5.150971 33.3316947)	5,845211177	5175,252	255,0179105	a imbuto "inclinato"
201	Point (-5.14932096 33.33288872)	35,84273428	2869,898	189,9057711	a imbuto "inclinato"
202	Point (-5.14588438 33.32965517)	25,68882223	4711,254	243,3174137	a imbuto
210	Point (-5.1380736 33.34474248)	2,303226533	585,8	85,79848429	a piatto
213	Point (-5.18107198 33.29916044)	20,95421389	45080,101	752,6574629	a imbuto
214	Point (-5.1719496 33.30044487)	35,5717072	4208,265	229,9622091	a piatto
216	Point (-5.17324807 33.3030098)	4,606453067	882,294	105,2959325	a piatto
217	Point (-5.16772682 33.30736701)	49,56629928	4489,281	237,5162496	a imbuto
219	Point (-5.18706976 33.30490602)	24,14578131	1836,251	151,9046102	a imbuto
220	Point (-5.18341957 33.30881477)	27,57133406	5695,362	267,5257552	a imbuto
220b	Point (-5.18340404 33.30876297)	54,54783694	4779,897	245,0835719	a piatto
222	Point (-5.2095619 33.30888656)	54,34173933	10315,085	360,0321944	a imbuto
223	Point (-5.21271479 33.30763425)	0,531078557	5805,807	270,1072425	a imbuto "inclinato"
227	Point (-5.16111543 33.31686873)	21,7530466	6686,021	289,8603419	a imbuto
228	Point (-5.16385983 33.31708737)	5,758066333	8058,568	318,2246881	a imbuto
237	Point (-5.15974232 33.32944998)	19,24307969	6468,755	285,1118601	a scodella
240	Point (-5.15906217 33.33563733)	11,76467703	7661,207	310,2798197	a imbuto
244	Point (-5.0852385 33.36123165)	0,194728804	2642,064	182,2118421	a imbuto "inclinato"
245	Point (-5.08337116 33.36050651)	27,38835752	834,333	102,3940315	a imbuto "inclinato"
246	Point (-5.08613985 33.36151986)	14,26875769	1153,181	120,3798149	a piatto
247	Point (-5.08640563 33.36184055)	12,84548008	914,223	107,1842574	a scodella
248	Point (-5.08871704 33.36633025)	21,77863016	18952,477	488,0203377	a imbuto
248b	Point (-5.08834524 33.36597194)	8,127173649	2725,007	185,0498524	a piatto
249	Point (-5.08665103 33.36256233)	11,90794725	5135,769	254,0432574	a imbuto
250	Point (-5.08630834 33.36520567)	10,66837174	1692,796	145,8502722	a piatto
251	Point (-5.089892 33.36839766)	52,52489389	4564,514	239,4981724	a piatto
252	Point (-5.09065332 33.36908667)	64,0771872	8382,872	324,5647491	a scodella
254	Point (-5.09015658 33.3729562)	35,61689688	3539,863	210,9104795	a piatto
255	Point (-5.09030931 33.37367663)	26,7463986	2501,346	177,2930931	a imbuto
256	Point (-5.09925001 33.37011198)	30,9996964	3478,412	209,0717923	a scodella

257	Point (-5.10146555 33.37239606)	13,51777044	34461,799	658,027454	a pozzo
258	Point (-5.09699104 33.37932945)	29,51151049	8617,057	329,0670629	a piatto
282	Point (-5.20477073 33.29521694)	24,45061577	3248,422	202,0417649	a scodella
283	Point (-5.19620106 33.29785664)	20,38977088	2959,16	192,8364625	a imbuto
284	Point (-5.19507435 33.29904546)	30,9996964	2437,868	175,0290056	a imbuto
285	Point (-5.19888463 33.29589368)	13,51777044	3179,721	199,8938532	a piatto
286	Point (-5.22873691 33.29933789)	29,51151049	2010,809	158,9609107	a imbuto
289	Point (-5.22684458 33.30104604)	21,79336183	3220,424	201,1691863	a scodella
291	Point (-5.2245247 33.30179488)	20,38977088	1486,202	136,6607666	a piatto
292	Point (-5.22363168 33.30347036)	54,79965704	5660,3	266,7010079	a scodella
297	Point (-5.22720712 33.30835769)	8,13547072	7750,773	312,0882665	a piatto
298	Point (-5.22811549 33.30650157)	21,7530466	433,737	73,82750091	a imbuto "inclinato"
300	Point (-5.22760655 33.30629253)	5,1822597	997,881	111,9809916	a piatto
302	Point (-5.23058766 33.29697935)	20,58907816	1097,762	117,4516247	a piatto
316	Point (-5.15507647 33.33932184)	14,60712401	8535,865	327,513119	a piatto
322	Point (-5.07878243 33.35504611)	16,73199147	4522,875	238,4032791	a piatto
352	Point (-5.1668828 33.30791001)	6,744474435	2902,492	190,9811252	a scodella
N1	Point (-5.20586844 33.2908373)	20,31793412	57,018	26,76769171	a piatto
N2	Point (-5.2122686 33.30397726)	2,59112985	2873,203	190,0150882	a piatto
N3	Point (-5.08823309 33.36555883)	18,84003746	991,069	111,5981199	a imbuto "inclinato"
N4	Point (-5.21373041 33.30797059)	24,86577414	4807,308	245,7853006	a piatto
N5	Point (-5.11665156 33.38031519)	4,632311253	4931,008	248,9274473	a imbuto "inclinato"
N6	Point (-5.10780326 33.38438218)	22,72472735	51399,769	803,6843577	a imbuto "inclinato"
N7	Point (-5.1513833 33.32863928)	30,50233802	132,321	40,77738008	a scodella
N8	Point (-5.16199784 33.33367509)	18,31211234	2832,669	188,6699989	a scodella
N9	Point (-5.18233906 33.29840649)	3,166936483	1525,756	138,4673801	a piatto
N10	Point (-5.16155311 33.33189026)	3,746930242	1123,217	118,8055601	a imbuto "inclinato"
N11	Point (-5.1804527 33.30441466)	12,78123351	8005,149	317,1682033	a piatto
N12	Point (-5.1842323 33.30903945)	4,632311253	290,948	60,46619219	a piatto
N13	Point (-5.18533161 33.30951105)	16,07262092	2347,122	171,7405163	a imbuto "inclinato"
N14	Point (-5.09783656 33.3767762)	62,16443535	1620,007	142,680091	a imbuto "inclinato"
N15	Point (-5.08616113 33.36452413)	1,439516583	248,229	55,85103053	a piatto
N16	Point (-5.08014172 33.35677645)	49,46791233	8526,723	327,337687	a piatto
N17	Point (-5.18225545 33.30420124)	28,07292922	2936,57	192,099003	a imbuto "inclinato"
N18	Point (-5.19486078 33.29788421)	17,40867555	878,583	105,0742575	a piatto
N19	Point (-5.17489421 33.30128919)	34,87723967	2825,595	188,4342696	a scodella

Figura 13. *Tabella riassuntiva delle misurazioni effettuate e di ulteriori parametri calcolati sulle doline situate nel Plateau di Azrou.*

5. Discussione

A partire dai dati del diagramma a torta e della tabella è possibile notare le differenze che ci sono fra le doline. Per capire come si formano le varie morfologie è necessario conoscere il modo in cui generalmente si originano le doline, per poter poi sviluppare delle ipotesi per spiegare la formazione di quelle presenti nel Plateau di Azrou.

5.1. Genesi e morfologia delle doline in rocce solubili

Nella classificazione delle forme carsiche è utile distinguere le forme di superficie (epigee) dalle forme profonde (ipogee) anche se molte forme carsiche superficiali si spiegano solo se considerate insieme alle forme profonde, che ne costituiscono il proseguimento verso il basso (Fig. 14).

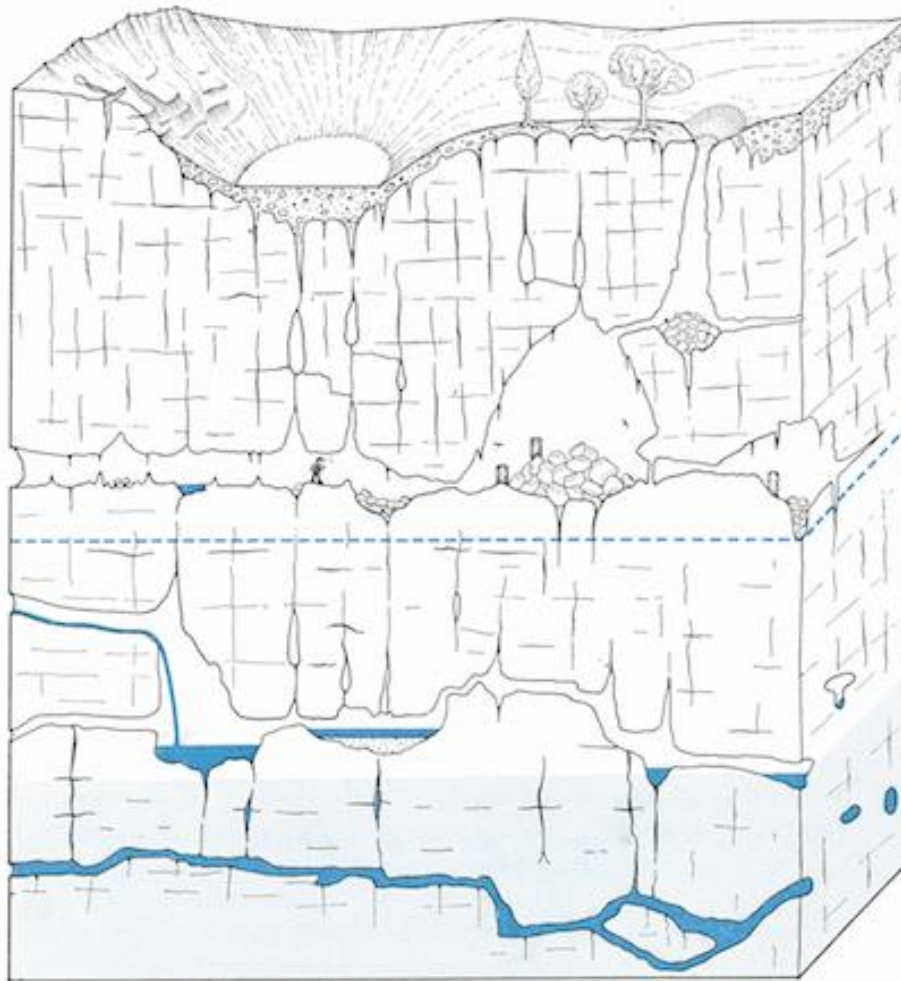


Figura 14. Spaccato verticale schematico di un sistema carsico. (Immagine da U. Sauro, 1979).

Esiste una vasta gamma di forme carsiche di superficie dalle dimensioni molto diverse, comprese fra pochi centimetri e molti chilometri.

Fra le forme carsiche la più tipica, considerata il simbolo dei paesaggi carsici, è la dolina, ovvero una conca chiusa, un bacino che si riempirebbe d'acqua originando un lago se il suo fondo e le sue pareti non fossero permeabili; invece, di solito l'acqua viene assorbita attraverso delle vie sotterranee, che solo raramente sono aperte in superficie e accessibili all'uomo; infatti, spesso il suolo o i detriti nascondono i punti assorbenti (Sauro, 1973; Gams, 1974).

In media le dimensioni del diametro sono comprese fra i 10 e i 1.000 metri e la profondità varia fra i 2 e i 200 metri; la forma in pianta può essere circolare, ellittica o irregolare, mentre la sezione verticale mostra sviluppi in altezza molto variabili anche in rapporto al diametro. Le forme più comuni che ne risultano sono (Sauro, 1979):

- a piatto: forma ampia e poco profonda, fondo piatto;
- a scodella: forma ampia e relativamente profonda, versanti complessivamente concavi;

- a pozzo: forma cilindrica con pareti subverticali, la profondità può essere molto superiore al diametro;
- a imbuto: forma all'incirca conica, versanti uniformemente inclinati verso un punto centrale.

Alle quattro forme più comuni identificate da Sauro (1979), per quanto riguarda il Plateau d'Azrou, è possibile aggiungerne una quinta, trovata frequentemente durante lo studio condotto sul campo; si tratta di una tipologia di dolina con forma ampia e relativamente profonda, avente una parete subverticale con crolli e un versante inclinato verso tale parete di crollo: durante lo studio condotto viene generalmente definita a imbuto "inclinato". Generalmente le forme più frequenti sono quella a piatto e a ciotola, tuttavia nel Plateau di Azrou se ne trovano molte con morfologia a imbuto. Doline coalescenti fra loro possono originare delle forme composite il cui contorno può essere soggetto a continui cambiamenti di forma (Fig. 15).

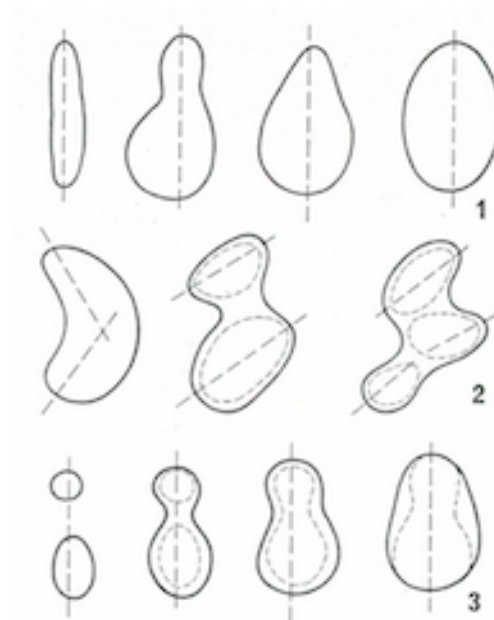


Figura 15. Perimetri tipici di doline. 1. Perimetri semplici; 2. Perimetri determinati da più diaclasi; 3. Sviluppo di una dolina per fusione di due doline minori. (Immagine da A. G. Segre, 1948).

Dal punto di vista genetico si distinguono i seguenti tipi di doline (Fig. 16) (Sauro, 1979):

- doline di dissoluzione normale: originate per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di scorrimento superficiale in movimento centripeto verso un punto assorbente che diventa così il centro di una forma chiusa che diventa sempre più profonda; sono le doline di gran lunga più numerose;
- doline alluvionali: sono delle conche chiuse che si formano in materiali alluvionali in seguito all'originarsi, nelle rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche di soluzione sub-superficiale o di crollo;

- doline di collasso o di crollo: sono cavità, spesso a pozzo, formatesi per il crollo del soffitto di grotte;

- doline di subsidenza in roccia: sono cavità che si formano in rocce coerenti e permeabili ma non solubili, che poggiano su rocce solubili; lo scavo di cavità carsiche nelle rocce solubili provoca fenomeni di crollo e subsidenza nelle formazioni rigide sovrastanti.

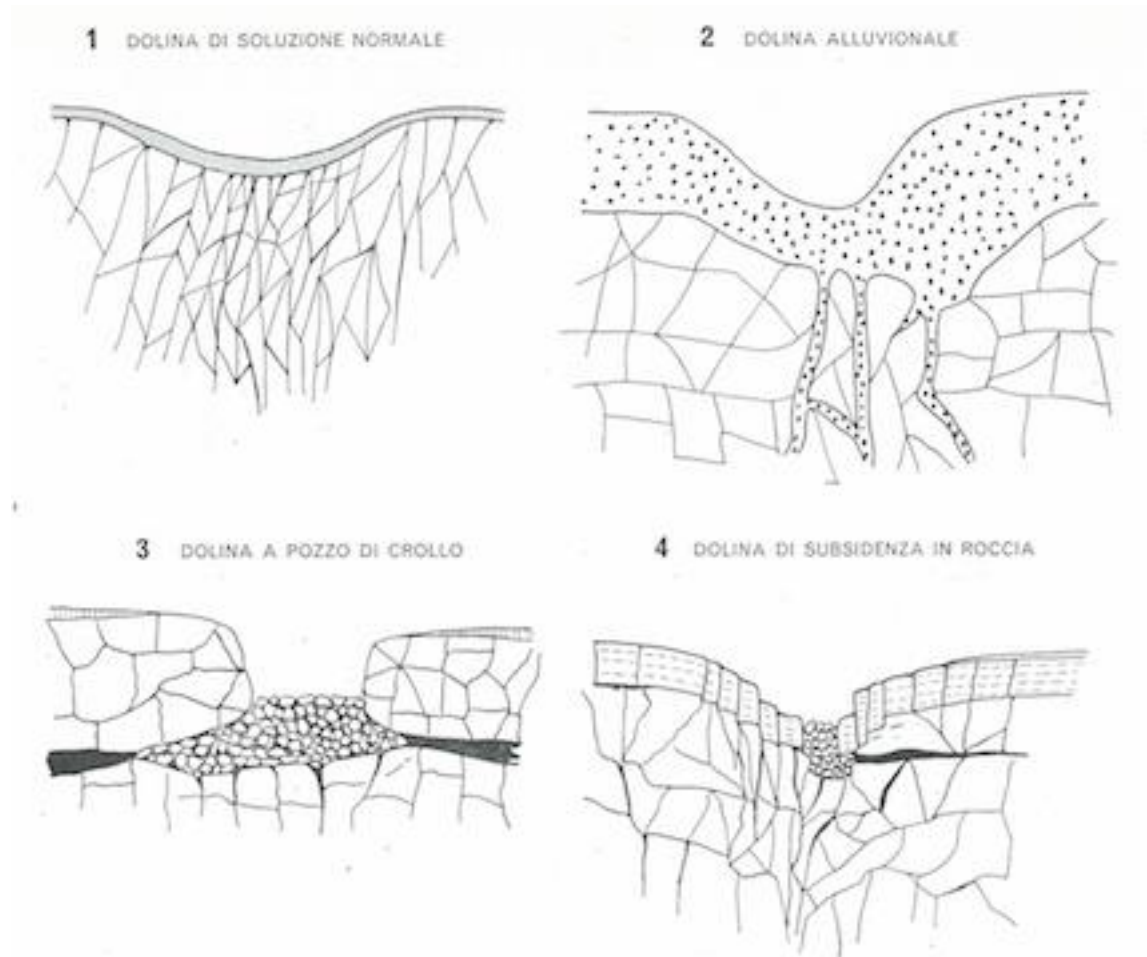


Figura 16. *Tipi di doline in rapporto alla loro genesi. (Immagine modificata da Williams, 1969).*

5.2. Ipotesi genetiche delle doline di Azrou

Dal rilevamento sul terreno risulta chiaro che quelle di Azrou sono effettivamente delle doline; la particolarità di queste formazioni sta non solo nella loro dimensione superiore alla media ma soprattutto nella loro particolare ubicazione, nella lava basaltica (Fig. 17).

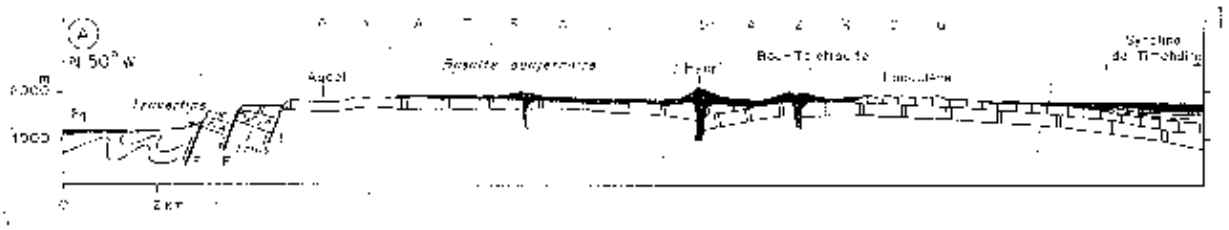


Figura 17. Schema rappresentativo del Plateau di Azrou. (Immagine modificata da J. Martin, 1981).

Le doline di Azrou, trovandosi in un plateau basaltico, non sono semplicemente spiegabili come risultato di un fenomeno di dissoluzione carsica; sono quindi state sviluppate varie ipotesi sulla loro genesi.

Già nel 1916, in seguito alle prime osservazioni, Gentil propone un'ipotesi, suggerendo che le cavità si siano generate da crolli del tetto di qualche grotta basaltica, formatasi per svuotamento di una massa di lava abbastanza spessa; queste cavità sarebbero quindi dovute a dei tunnel di lava.

In seguito, nel 1919, Blanche propone l'ipotesi di gigantesche bolle di gas che sarebbero scoppiate sulla superficie di colate laviche ancora calde.

Infine, nel 1940, Termier parla di falsi crateri che sarebbero il risultato sia di un franamento progressivo sia di un cedimento brusco della copertura di basalto che si trova al di sopra di gallerie carsiche sottostanti; infatti, come si è potuto verificare sul terreno, la colata basaltica ricopre un substrato calcareo (Martin, 1981).

Osservando queste cavità è evidente che esse siano dovute a dei movimenti discendenti (crolli) e non a delle cicatrici di esplosione di bolle, come invece sosteneva Blanche. L'ipotesi di Gentil va invece presa in considerazione; infatti, molte cavità o grotte possono spiegarsi soltanto considerando il crollo localizzato del tetto di alcuni tunnel di lava.

Il reale problema diventa quindi sapere se tutte le cavità presenti nel basalto hanno la stessa origine. L'osservazione attenta di queste cavità fa pensare che, almeno nella maggior parte dei casi, abbiamo a che fare con dei crolli di formazioni carsiche sottostanti, come proponeva Termier.

6. Conclusioni

L'origine criptocarsica risulta la più convincente e gli argomenti a favore di tale ipotesi sono vari.

La disposizione delle cavità segue delle regole particolari. Lo strato basaltico si estende per vari chilometri ma solo dove gli strati sono più sottili, come ad esempio vicino agli affioramenti calcarei, si trova la maggiore densità di collassi e doline.

I bordi di colata ai piedi dei rilievi carbonatici sono generalmente circondati da piccole concavità nel basalto; dove lo strato basaltico è poco spesso (meno di 10 m) si trovano abbassamenti a fondo piatto, invece dove lo spessore del basalto si accresce appaiono delle cavità a pozzo o ad imbuto di 15-20m di profondità (Martin, 1981).

Trovando degli allineamenti di cavità è possibile giustificarli con la presenza di una rete sotterranea; infatti, gli allineamenti di cavità più o meno coalescenti seguono la direzione dei flussi basaltici (tunnel di lava).

Tuttavia, alcuni allineamenti non possono essere messi in relazione con crolli di tunnel di lava, dal momento che sono obliqui o perpendicolari alla direzione di questi flussi.

Il collasso del substrato calcareo risulta un argomento determinante ma è possibile osservarlo solo in poche zone in cui vi è l'evidenza di cavità a fondo erboso che tagliano il mantello basaltico, facendo affiorare nella parte inferiore le rocce calcaree. Allo stesso modo in cavità con forma simile ad un "doppio imbuto", il calcare affiora sulla parete di separazione.

Questa è la prova che i crolli carsici hanno causato anche il crollo della copertura basaltica e quindi è possibile definire queste cavità come criptocarsiche.

Bibliografia

- AA. VV. (1975) – Carte Géologique du Maroc, Fenille El Hajeb. Service Géologique du Maroc, Nantes.
- Beaudet G. & Martin J. (1967) – Observations morphologiques sur les bordures nord – ouest et ouest du Moyen Atlas. *Revue de Géographie du Maroc*, 12, 113 – 142.
- Bogli A. (1971) - Karstdenudation - das Ausmass des korrosiven Kalkabtrags, 91- 97.
- Bogli A. (1978) – Karsthydrographie und physische Spelaologie. Ed. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 300.
- Colo G. (1964) – Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 139, 226 pp.
- De Waele J., Di Gregorio F., Melis M. T. & El Wartiti M. (2009) - Landscape units, Geomorphosites and Geodiversity of the Ifrane-Azrou region (Middle Atlas, Morocco), 63 – 75.
- El Khalki Y. & Akdim B. (2001) – Les dolines d'effondrement et les dolines-lacs des Causses du SW du Moyen Atlas (Maroc). *Karstologia*, 38 (2), 19 – 24.
- Gams I. (1974) - Concentration of CO₂ in the cave in relation to the air circulation in the case of the Postojna Cave. *Acta Carsologica*, 6/12, pp. 185-192.
- Gams I. (1965) - Types of accelerated corrosion, in “Problems of the Speleological Research”, I. Praga, pp. 213.
- Gèze B. (1965) - Les conditions hydrogéologiques des roches calcaires, *Chronique d'Hydrogéol.*, 7, 9-39.
- Harmand C. & Cantagrel J. M. (1984) – Le volcanisme alcalin tertiaire du Moyen Atlas (Maroc): Chronologie K/Ar et cadre géodynamique. *J. Afric. Earth Sci.*, 2 (1), 51 – 55.
- Harmand C. & Moukadiri A. (1986) – Synchronisme entre tectonique compressive et volcanisme alcalin: exemple de la province quaternaire du Moyen Atlas (Maroc). *Bull. Soc. géol. France*, 2 (4), 595- 603.
- Martin J. (1981) - Le Moyen Atlas central, étude géomorphologique. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, 445 pp.
- Michard A. (1976) – Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, pp. 408.

- Piqué A. (1994) – Géologie du Maroc. Les domaines régionaux et leur évolution structurale, Editions Pumag, pp. 239.
- Piqué A. & Laville E. (1993) – Les series triasiques du Maroc, marqueurs du rifting atlantique. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie 2, Sciences de la Terre et des Planetes, Earth and Planetary Sciences, 317, 1215 -1220.
- Rahhali I. (1970) – Foraminifères benthoniques et pélagiques du Crétacé supérieur du synclinal d'El Koubbat (Moyen Atlas, Maroc). Notes Serv. Géol. Maroc, 30 (225), 51 – 98.
- Sauro U. (1973) - Il paesaggio degli Alti Lessini - Studio geomorfologia, Museo Civ. St. Nat. Verona, Mem. f.s. 6, 37 – 41.
- Sauro U. (1979) – Morfologia carsica. Geomorfologia G. B. Castiglioni Utet, 208 – 254.
- Segre A. G. (1948) – I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio. Pubbl. Ist. Geogr. Univ. Roma, s. A, n. 7, pp. 248.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare in primo luogo il Professore Jo De Waele, che mi ha permesso di fare questa esperienza di studio prima a Cagliari, in fase preliminare, e poi sul terreno in Marocco.

Vorrei poi ringraziare la Professoressa Maria Teresa Melis dell'Università di Cagliari, che mi ha affiancato nello svolgere la parte di lavoro in telerilevamento e che gentilmente mi ha accolto nella sua città.

Ringrazio il villaggio di Azrou (Marocco), nel quale è stato svolto lo studio per aver permesso lo svolgimento del lavoro di tesi e conoscere ed assaporare una terra per me tutta da scoprire.

Un grande grazie per il loro aiuto e disponibilità va anche a Tullio Dainese e Gabriela Squarzonzi per la parte informatica, alla Professoressa Carla Pellandra per il francese, a Ashanty Jones e, in particolare, Sharon Pierini per la parte grafica.

In particolar modo vorrei ringraziare le persone che in questi anni di percorso universitario mi hanno sostenuto e motivato nei momenti belli e brutti, che mi hanno incitato a puntare in alto e a non fermarmi, ad impegnarmi fino in fondo e a non mollare; ringrazio quindi mia madre, che c'è sempre stata in tutti i miei momenti di tensione di qualsiasi tipo; mio padre, che nonostante il suo aspetto più serio, so che farebbe qualsiasi cosa per me; Luca, mio fratello, con il quale ho un fortissimo legame, anche se non sembra; Alberto, per essere stato la mia boa quando stavo annegando.

Ringrazio inoltre tutti i miei amici che, nonostante non mi abbiano aiutato nell'affrontare la stesura di questa tesi, sono fortunato ad avere affianco nell'affrontare la vita.