

# L'INCREDIBILE SITO GEOLOGICO DI DALLÒL

Luca Lupi



Pontedera, marzo 2022

# L'incredibile sito geologico di Dallòl

Luca Lupi\*

\*Centro di Documentazione e Studi sulla Dancalia Italiana, Pontedera

## Introduzione

Nella porzione settentrionale della depressione della Dancalia (Afar) in Etiopia, al centro della *Piana del Sale*, a poca distanza con la frontiera dell'Eritrea, si erge l'isolotto di Dallòl, nel suo genere unico al mondo per le particolarissime manifestazioni geologiche. **Qui s'incontrano due sistemi geologici**: sopra un sistema sedimentario costituito da evaporiti quaternarie (arricchite in potassio, manganese, ferro, magnesio e zinco), in prevalenza sale che dà nome alla piana, costituito da depositi che testimoniano la lunga presenza delle acque salate del Mar Rosso; sotto un sistema vulcanico che presenta importanti quantità di magma caldo molto vicino alla superficie. L'interazione tra questi due sistemi ha generato questo fenomeno geologico unico, dalle varie, uniche e coloratissime manifestazioni superficiali.

In passato importantissima sede dell'estrazione di **sali potassici** (oggi strategici per la produzione di fertilizzanti, scoperta e avviata a partire dal 1911 dagli italiani Adriano e Tullio Pastori) dal 2000 fino ai giorni nostri, nonostante la collocazione remota e le altissime temperature, è stata meta di spedizioni scientifiche e di un selezionato turismo naturalista. Attualmente l'accesso è interdetto perché sede di combattimenti dovuti alla guerra tra Etiopia e la sua regione del Tigrai, iniziata nel novembre del 2020 e ancora in corso, hanno coinvolto pesantemente anche la regione della Dancalia.

| Mese                                    | Gennaio | Febbraio | Marzo | Aprile | Maggio | Giugno | Luglio | Agosto | Settembre | Ottobre | Novembre | Dicembre | Anno |
|-----------------------------------------|---------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|---------|----------|----------|------|
| Temperatura massima misurata (°C)       | 39      | 42       | 48    | 46     | 49     | 48     | 49     | 48     | 48        | 46      | 44       | 41       | 49   |
| Media Temperature massime misurate (°C) | 36.1    | 36.1     | 38.9  | 40.6   | 44.4   | 46.7   | 45.6   | 45     | 42.8      | 41.7    | 39.4     | 36.7     | 41.2 |
| Temperatura media (°C)                  | 30.3    | 30.5     | 32.5  | 33.9   | 36.4   | 38.6   | 38.7   | 37.6   | 37.3      | 35.6    | 33.2     | 30.8     | 34.6 |
| Media Temperature minime misurate (°C)  | 24.6    | 24.6     | 26    | 27.1   | 28.5   | 30.4   | 31.8   | 31     | 31.6      | 29.6    | 27.1     | 25.7     | 28.2 |
| Temperatura minima misurata (°C)        | 22      | 22       | 21    | 21     | 23     | 25     | 24     | 24     | 27        | 26      | 24       | 24       | 21   |

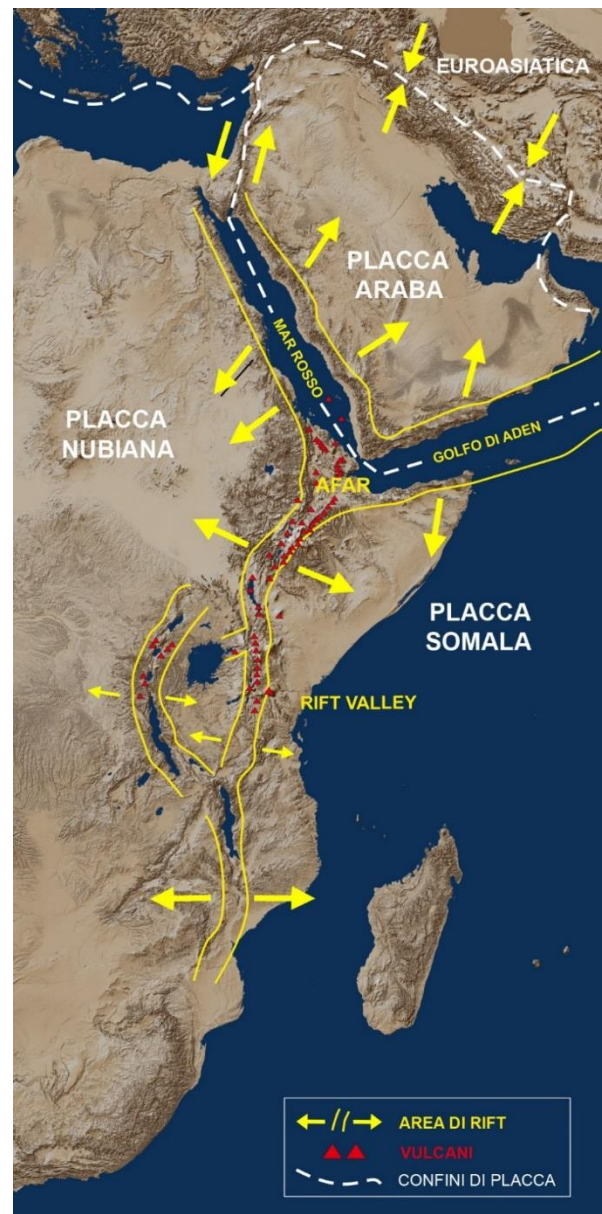
**Tabella I – Temperature area di Dallòl nei periodi misurati dal 1960-1966.** Record meteorologici della Dancalia: La Dancalia è una regione tra le più estreme al mondo, dove le temperature raggiungono livelli record e le medie termiche sono considerate le più alte al mondo. Questa regione dove normalmente si misurano temperature elevatissime – anche oltre i 50°C – ha un clima torrido ed è quindi estremamente arida. La massima temperatura media annua: Dallòl, Etiopia: dal 1960 al 1966 è stata 34.6°C. Nelle nostre zone la temperatura media annua è di circa 13°.



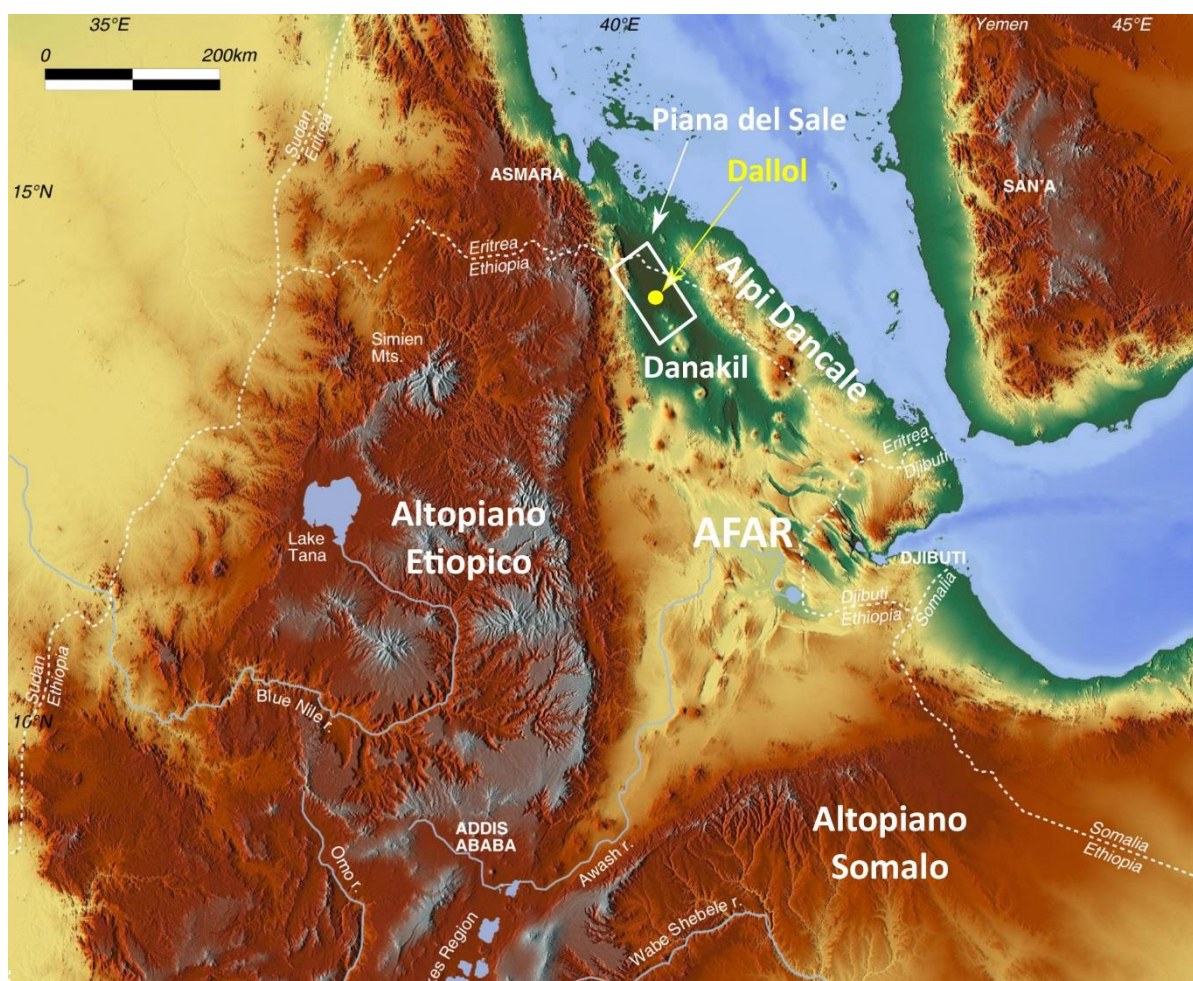
## Inquadramento geotettonico

L'**Afar** è una regione desertica di forma triangolare, depressa ed estesa 150.000 km<sup>2</sup> a cavallo di Etiopia, Eritrea e Gibuti, delimitata ad ovest dalla scarpata dell'altopiano etiopico (circa 520 km), ad est dal Mar Rosso (circa 550 km dalla penisola di Buri al golfo di Tagiura) e a sud dall'altopiano dell'Harar. Il triangolo di Afar è l'area di congiunzione di tre grandi sistemi di fratture della crosta terrestre: il Mar Rosso, il Golfo di Aden e la Great Rift Valley africana, che delimitano le grandi placche Nubiana, Somala e Araba (Hutchinson ed Engels, 1972; Collet e al., 2000 ; Eagles t al., 2002 ; Tesfaye t al., 2003 ; Bonatti e al., 2015 ; Corti e al., 2015; Bastow e al., 2018 (Fig.1). Tale depressione può essere vista anche come un "oceano in formazione" dove dal sottostante mantello fuoriescono lave che la riempiono principalmente di rocce effusive basaltiche. La **Dancalia** (chiamata dal punto di vista geologico microplacca *Danakil*) è la porzione settentrionale dell'Afar, estesa circa 50.000 km<sup>2</sup> quasi totalmente sotto il livello del mare.

**Fig. 1** – Il sistema geotettonico dell'Africa Orientale dove il triangolo dell'Afar, rappresenta il punto triplo dove si originano 3 grandi sistemi di fratture della crosta terrestre: la grande Rift Valley africana, il Golfo di Aden (golfo proto-oceanico), Il Mar Rosso, tre stadi evolutivi dell'apertura di un oceano elaborazione grafica L. Lupi).



Due notevoli scarpate limitano la depressione. A ovest, ancora l'Altopiano Etiopico settentrionale, di origine precambriana e mesozoica, il quale raggiunge e supera la quota di 2000 m. Ad est, le Alpi Dancale meno prominenti "appoggiate" sulla microplacca tettonica, il **Danakil Block**, che si innalza a 500-1000 m sul livello del mare (Collet e al., 2000), (Fig. 2).



**Fig. 2** - Modello digitale di elevazione (DEM) che mostra la topografia della depressione dell'Afar e delle aree circostanti (dati della Shuttle Radar Topography Mission, NASA-SRTM; risoluzione 90 m, elaborazione grafica L. Lupi).

Nella Dancalia settentrionale quando l'estremità settentrionale di un antico braccio del Mar Rosso fu ripetutamente chiusa nel Golfo di Zula (Eritrea) a causa di sollevamenti tettonici si formò una enorme distesa di sali evaporitici. Si conoscono almeno **2 cicli marini completi con ingressione e regressione** avvenuti 200.000 anni fa e 80.000 anni fa (Lalou e al., 1970; Bonatti e al., 1971 ; Mitchell e al., 1992 ; Corti e al., 2015). La chiusura totale avvenne probabilmente durante il Pleistocene e la successiva evaporazione dell'acqua di mare portò alla **deposizione di una sequenza di sali evaporitici** molto spessa per diverse migliaia di anni (Bonatti e al., 1971). Questa serie evaporitica quaternaria, che affiora in superficie per circa 600 km<sup>2</sup>, soprattutto nella regione a nord del massiccio vulcanico dell'Erta Ale, è chiamata "**Piana del Sale**" posta interamente sotto il livello del mare, (Fig. 3 e Fig. 4). Si tratta in maggioranza di una formazione di sale associato ad anidride, sali di potassio e magnesio con delle piccole intercalazioni di prodotti vulcanici rimaneggiati. Lo spessore di questa serie evaporitica, nella parte assiale della depressione, è stato stimato maggiore di 1000 metri ma secondo altre stime può essere superiore a 3000 metri (Holwerda J.G. e Hutchinson R.W., 1968). L'affioramento di questa serie evaporitica è interrotto a sud dalla catena vulcanica dell'Erta Ale, lunga 95 chilometri, che occupa proprio il centro dell'asse della depressione.



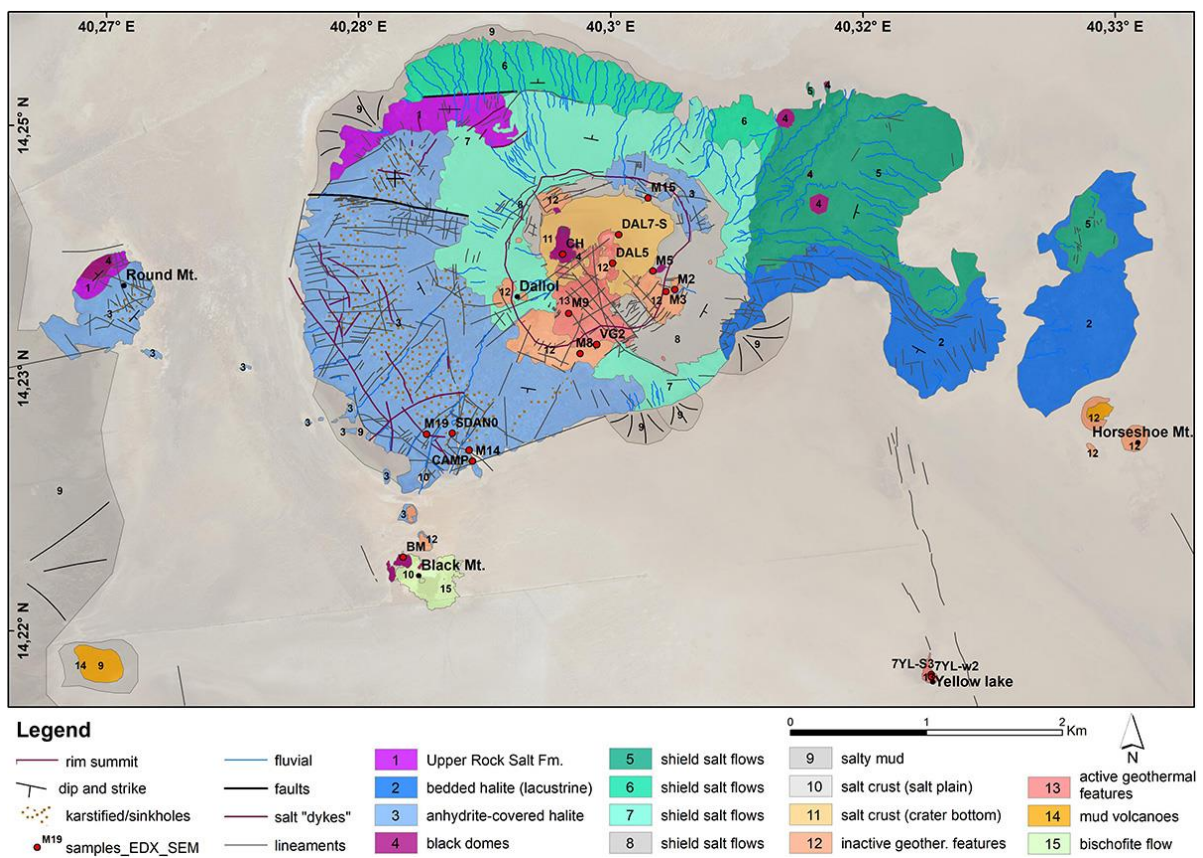


**Fig. 3** - L'isolotto di Dallòl posto al centro della Piana del Sale. La Piana del Sale, misura circa 100 chilometri lungo il suo asse maggiore che si sviluppa parallelamente alla costa del Mar Rosso, e in media una trentina di chilometri di larghezza. Immagine catturata dal satellite Sentinel-2 il 3 maggio 2020 (cortesia *Copernicus EU Earth observation programme*).





**Fig. 4** - La bianca Piana del Sale resti dell'antico Mar Rosso: in alcuni luoghi il sale si presenta limpidissimo e cristallino, così bianco da dare la completa illusione di un paesaggio ricoperto di neve. In altri luoghi è inquinato da un po' d'argille che conferiscono al terreno una colorazione grigiasta in parte chiara e in parte scura.



**Fig. 5** - Mappa geologica dettagliata della cupola di Dallol e delle strutture adiacenti (López-García J. M, e al. 2020).



## Geologia di Dallòl

L'isolotto di Dallòl (nel punto più alto misura -90 metri s.l.m.) dalla forma simile a un vulcano a scudo, è una cupola di sale spinta dal magma sottostante probabilmente a partire da circa 6.000 anni fa, è emersa di circa 30 metri sulla piana salata che in quell'area ha una quota media di -120 metri s.l.m. La struttura avente una superficie di 8 km<sup>2</sup>, ha una forma ovale con un asse maggiore orientato ENE-OSO e lungo circa 5,5 chilometri e un asse minore di 3 chilometri (**Fig. 5**). La cupola di Dallòl è costituita essenzialmente da alternanze di strati di **Alite** (il sale di cloruro di sodio NaCl detto anche salgemma) di colore grigiastro o rossastro spessi pochi centimetri (3-10 cm) ed rossastri **strati di fine argilla** provenienti dall'erosione delle rocce dell'altopiano e trasportati con le occasionali alluvioni (**Fig. 6**).

**Fig. 6** – l'alternanza di strati di sale e argille rossastre. Gli strati di argille, che si ripetono in alternanza per decine di metri, mostrano uno spessore maggiore corrispondono al periodo delle grandi piogge sull'Altopiano Etiopico (il cosiddetto *Krempt*) da metà giugno a metà settembre mentre gli strati più sottili sono legati al periodo delle piccole piogge (tra aprile e maggio).





Sopra questa formazione prima descritta si trova, a corona, un banco alto mediamente 4 metri costituito da **Gesso** (solfato di calcio biidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e **Anidrite** (solfato di calcio anidro  $\text{CaSO}_4$ ) con frammenti di calcari coralliferi (**Fig. 7, 8**). Al centro della cupola è presente un nucleo integro e compatto mentre ai bordi si rinvencono fratture e canali (in alcuni casi veri e propri canyon) dove emergono numerosissimi rilievi in posizione più o meno ravvicinata, aventi forme di torrioni tronco-piramidali, bastioni, muraglie e pinnacoli (**Fig. 9, 10**).

Le acque superficiali, scavando canali di scorrimento lungo sottili fenditure della copertura gessosa, hanno poi molto più facilmente eroso ed asportato gli strati salini sottostanti che per la loro natura sono molto solubili. L'azione erosiva dell'acqua e degli altri agenti atmosferici hanno modellato l'incredibile paesaggio di Dall'ol.

**Fig. 7** - La cupola di Dall'ol è composta di numerosissimi rilievi fra loro più o meno ravvicinati, aventi forme di torrioni tronco-piramidali, bastioni, muraglie, pinnacoli, colonne. I depositi sono formati da alternanze di strati dello spessore da 10 a 20 cm mostrano strati chiari di Sali evaporitici (in prevalenza Alite) ricchi in potassio e strati più scuri di argille alluvionali finissime. Questi strati di argille ed evaporiti si ripetono per decine di metri e alla sommità presentano a copertura un banco gessoso spesso mediamente 4 metri.

















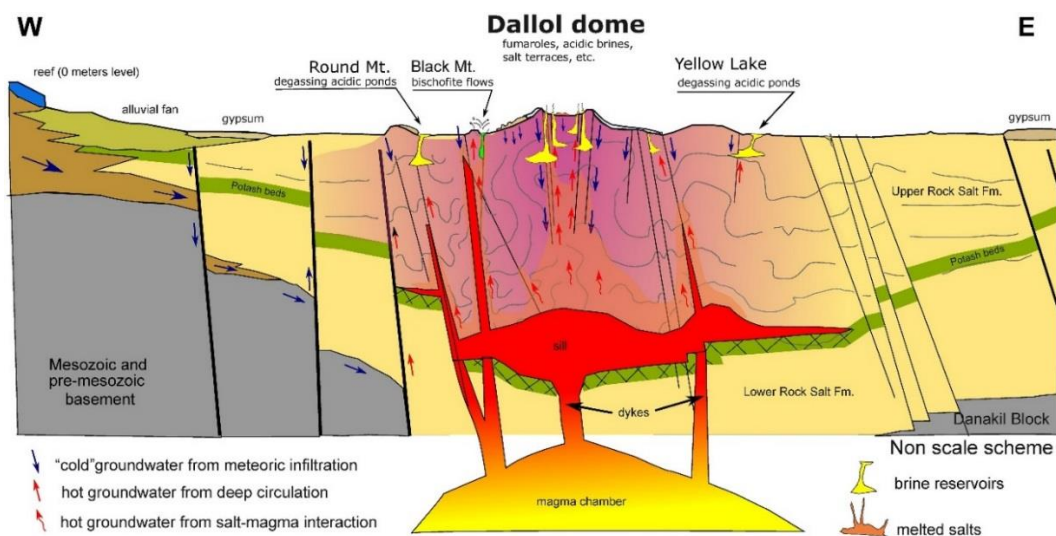


**Fig. 11, 12, 13** – In alcune aree alla base dell'isolotto di Dall'òl, tra i canali erosi e frastagliati, si possono ammirare alcune formazioni di sale cristallizzato con inclusioni argillose, acuminate e taglienti come rasoi e dalle sorprendenti trasparenze.



## Dall'ol non è ancora un vulcano

L'isolotto di Dall'ol, per la sua morfologia simile a un vulcano, per l'attività geotermica sommitale e per la posizione del suo rilievo sull'asse centrale della depressione dove sono presenti a sud-est tutti i vulcani della Dancalia (catena dell'Ertà Ale, Barowli e Alayta) e anche altri estinti presenti più a nord-ovest (Marahao, Alid e Jalua), è stato spesso nominato secondo me impropriamente da vari autori come il “vulcano Dall'ol” (Edelmann et al., 2010 ; Keir et al., 2013 ; Tadiwos, 2013 ; Wunderman, 2013 ; Corti et al., 2015 ). Tuttavia, **materiali vulcanici non sono mai stati trovati** sulla cupola o nelle immediate vicinanze dato che la sua geologia è costituita essenzialmente da strati di rocce sedimentarie. Quindi personalmente ritengo sia più corretto affermare che sia un luogo che attualmente rappresenta una **manifestazione proto-vulcanica** correlata a faglie distensive e ad un intrusione di magma e che in futuro forse, con la risalita e fuoriuscita del magma, originerà un vulcano. Secondo alcuni recenti lavori (López-García e al., 2000) Dall'ol è il risultato dell'interazione della serie evaporitica superficiale con l'**intrusione magmatica** sottostante, che grazie alle **acque sotterranee** risale dalle faglie e fratture originate dalla tettonica distensiva dell'area (nelle vicinanze di Dall'ol si verificano frequenti terremoti di magnitudo 4,5-5,5) dando così origine ad una grande attività idrotermale e a intensi processi di alogenosi (**Fig. 14**). La Dancalia è un area dove non piove quasi mai, ha **clima iper-arido** (<200 mm / anno di pioggia) con il record mondiale ufficiale della temperatura media annuale più alta (34,5 ° C; Pedgley, 1967). La maggior parte delle acque della falda provengono allora dall'infiltrazione dalle precipitazioni che stagionalmente avvengono sull'altopiano etiopico 2 volte l'anno (le grandi piogge comprese tra la metà di giugno e la metà di settembre *Krempt* e le piccole piogge tra aprile e maggio) e nelle Alpi Dancale che causano periodiche inondazioni della depressione. Riscaldata in profondità, l'acqua meteorica si mescola con i fluidi geotermici derivati da reazioni chimiche tra sali e fluidi magmatici che risalgono anche dalle molteplici fratture nell'area geotermica (Holwerda e Hutchinson, 1968 ; Hovland et al., 2006 ; Franzson et al., 2015 ; Warren, 2015). I sali evaporitici degli strati più profondi interagiscono quindi con i fluidi magmatici che risalgono ad alta temperatura ricchi di gas vulcanici (anidride carbonica CO<sub>2</sub>, anidride solforosa SO<sub>2</sub> e acido solfidrico H<sub>2</sub>S) dando origine alla salamoia acida anossica ipersatura che si sviluppa nella cupola di Dall'ol.



**Fig. 14** - Sezione del sistema geologico di Dall'ol con schema interpretativo (López-García J. M, e al. 2020).

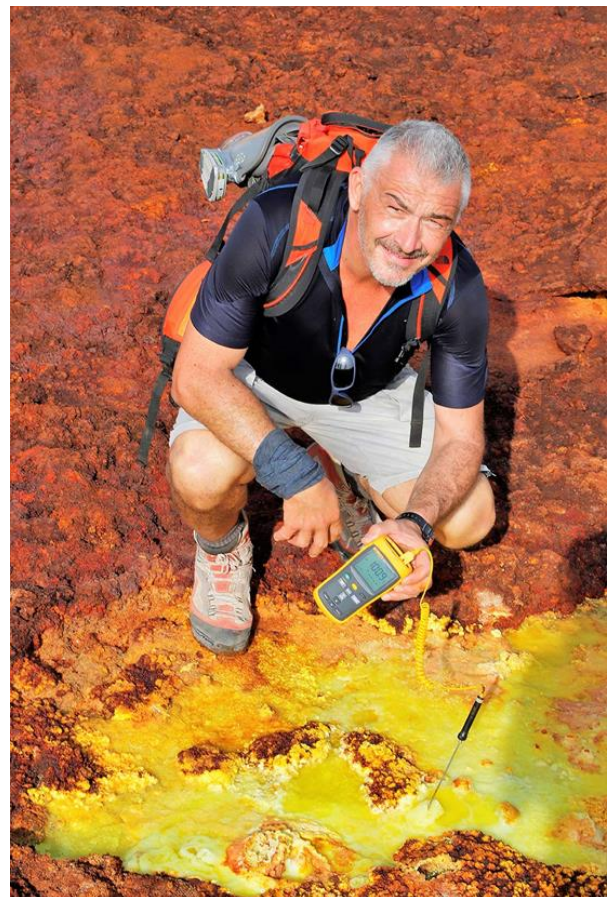


## Attività geotermica ed idrotermale

I fluidi rilasciati dalla massa magmatica sottostante risalgono (dalle faglie e dalle fratture dovute alla tettonica distensiva) caldissimi verso la superficie, al centro dell'isolotto, dando origine ad una intensa **attività geotermica** che occasionalmente include **esplosioni freatiche** (dovute al vapore ma dove non c'è presenza diretta di magma); sono documentate almeno 2 grandi esplosioni freatiche avvenute nel 1926 e nel 2011. L'interazione del sale di Alite primario, che costituisce il rilievo Dall'òl, con i fluidi magmatici della massa sottostante e le acque della falda sotterranee (arrivate nella depressione dancala con periodiche alluvioni dovute alle precipitazioni sull'altopiano etiopico e in seguito infiltrate nel sottosuolo) genera dei complessi **processi chimici alogenetici** dove fluoro, cloro, bromo e iodio sono capaci di combinarsi con i metalli per originare sali aloidi che non contengono ossigeno (Talbot, 2008; Warren, 2015). Tutta questa interazione geochemica, ad oggi ancora poco conosciuta e studiata, produce in superficie una incredibile varietà di stagni colorati con **salamoie iperacide e ipersature**, fumarole, geyser piccoli, depositi di sale di forme strane e diversissime, singolari *hornitos* (pinnacoli che generalmente si formano per accumulo di materiali incandescenti fuoriusciti da fratture sulle superfici solidificate di colate e laghi di lava) e tante altre manifestazioni idrotermali e geotermiche. I colori dei depositi delle fumarole anch'essi hanno una miriade variazioni dal giallo legato alla grande quantità di zolfo, al marrone scuro dovuto invece all'ossidazioni del ferro, colori bellissimi ma comuni in aree vulcaniche.

Ma sono i **colori delle salamoie** delle piscine che stupiscono e lasciano letteralmente a bocca aperta. Dall'òl è conosciuta per la spettacolare varietà dei suoi colori che, oltre agli scienziati e agli appassionati, attirano e incuriosiscono chiunque.

**Fig. 14** - Le temperature delle fumarole e delle salamoie iperacide ( $\text{pH} \leq 0$ ), presentano temperatura dai  $100^\circ$  ai  $110^\circ \text{C}$  con temperature massime di  $125\text{--}130^\circ \text{C}$ .

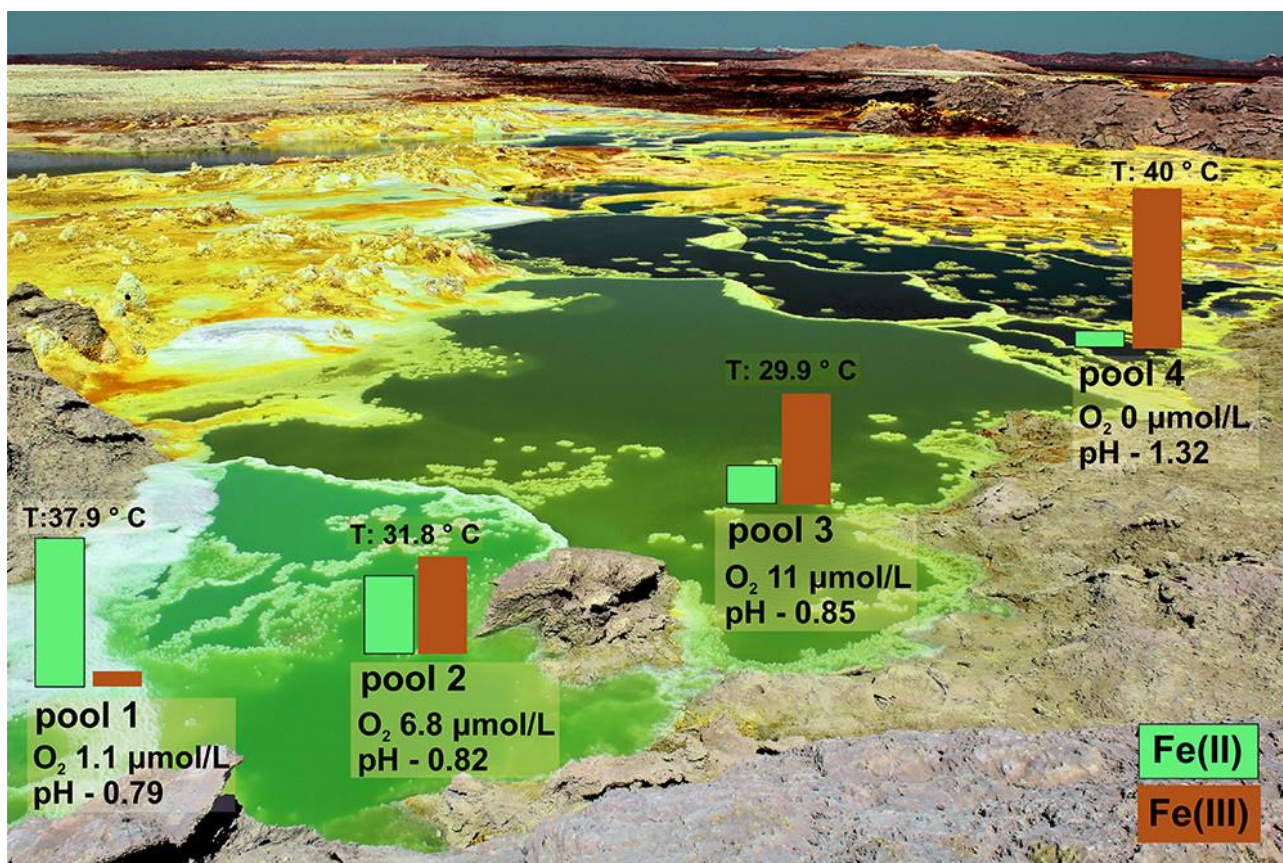






**Fig. 15, 16** – Varie misure ripetute negli anni hanno sempre mostrato i soliti ordini di grandezza delle temperature.





**Fig. 17** – Immagine di una piscina idrotermale di Dallòl con sopra riportate indicazioni per ciascuna pozza della temperatura, Ph, concentrazioni di ossigeno disciolto, rapporti tra concentrazioni delle fasi ferrose  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  (Kotopoulou e al., 2019).

Nel punto di fuoriuscita il vapore dell'acqua anossica (senza ossigeno), iperacida, ipersalina e ricca di ferro, misura temperature di 105-108°C (**Fig. 14, 15, 16**). Quando l'acqua bollente fuoriesce, la temperatura diminuisce rapidamente causando una sovrasaturazione e una rapida precipitazione di salgemma. L'acqua defluisce nelle vasche, allontanandosi progressivamente dalla sorgente, scendendo a temperature intorno ai 30°C. Queste acque hanno valori di pH pari o inferiori a 0 e salinità comprese tra il 37% e il 42%.

Alte concentrazioni di ferro disciolto (più di 26 g/l), solfati (~5200 ppm) e cloruri (>200 g/l) contribuiscono alla formazione di idrossicomplessi di ferro colorati, clorocomplessi di ferro e solfati di ferro (per fare un paragone con l'acqua di mare contiene valori assai più bassi: tracce di ferro, ~2680 ppm di solfati e ~19 g/l di cloruro).

I colori brillanti delle acque delle salamoie variano dal giallo fosforescente all'arancione, alle sfumature di blu e verde, dovuto allo stato di ossidazione delle specie in soluzione come cloruro ferroso ( $\text{FeCl}_2$ ) e cloruro ferrico ( $\text{FeCl}_3$ ). L'acqua che fuoriesce inizia con alte concentrazioni di ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) che a contatto con l'atmosfera viene lentamente ossidato diventando ferro ferrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), facendo sì che il colore delle acque della piscina si spostino gradualmente dal verde brillante al verde scuro al marrone. Fuori dall'acqua, sottili strati di ferro-(ossi)idrossidi e solfati di ferro precipitati sulle strutture di salgemma conferiscono loro un aspetto altrettanto colorato (**Fig. 17**).



Le **sorgenti idrotermali** sono:

- **anossiche** (totalmente prive di ossigeno)
- **iper-acide** (pH <-1,5- 6,0), i valori di pH diminuiscono molto al di sotto dello zero
- **iper-saline** (da 33% ad oltre 50%, circa 10 volte più salina di acqua di mare)
- **iper-termale** (da 25° ad alta temperatura > 110 ° )
- salamoie contengono **valori di Ferro (Fe) > di 26 g / litro**

**Elementi presenti** nelle acque termali (dati *SVG Bulletin* 32, aprile 2003):

| Elemento | mg/l                 |
|----------|----------------------|
| Fe       | 4900                 |
| Mg       | 3100                 |
| Mn       | 270                  |
| Al       | 160                  |
| B        | 140                  |
| Si       | 130                  |
| Ca       | 125                  |
| Zn       | 48                   |
| Cu       | 2.6                  |
| Se       | 1.9                  |
| As       | 0.5                  |
| Hg       | $2.4 \times 10^{-3}$ |
| Ag       | $2.0 \times 10^{-3}$ |

Le principali **fasi minerali** che si incontrano a Dall'òl (da Lòpez-García J. M e al., 2020):

- Halite (Cloruro di NaCl)
- Jarosite (gruppo dell'Alunite  $KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$ )
- Ematite (ossido ferrico,  $Fe_2O_3$ )
- Akaganeite [ossido di ferro idrato  $Fe^{+++}(O,OH,Cl)$ ]
- altri ossidi di ferro idrati (ossi-drossidi)
- Gesso (solfato di calcio biidrato,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )
- Anidrite (solfato di calcio anidro,  $CaSO_4$ )
- Silvite (cloruro di potassio, KCl)
- Carnallite ( $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ )
- Bischofite ( $MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$ )

Le principali **fasi gassose** emesse dalle sorgenti e dalle fumarole sono:

- $CO_2$  (anidride carbonica)
- $H_2S$  (acido solfidrico)
- $N_2$  (Azoto)
- $SO_2$  (Anidride Solforosa)
- tracce di  $H_2$  (Idrogeno)
- tracce di Ar (Argon)
- tracce di  $O_2$  (Ossigeno)

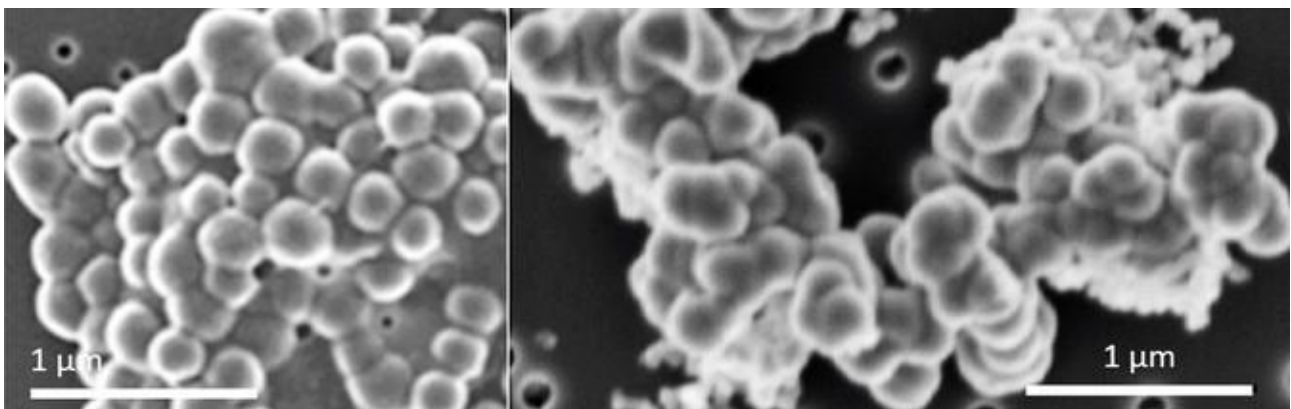


Insomma un tripudio di colori dove la natura si è sbizzarrita utilizzando selvaggiamente la sua tavolozza di colori che lascia sbalordito chiunque abbia la fortuna di vederli.

A differenza di altri sistemi idrotermali noti per le loro piscine colorate (es. Yellowstone), dove i colori sono generati dall'attività biologica, la tavolozza dei colori di Dall'ol è invece prodotta dall'**ossidazione inorganica delle fasi di ferro** qui molto abbondanti.

Una fondamentale caratteristica di questo sito è che l'attività idro-geotermica fluttua rapidamente nella cupola perché evolve in continuazione trasformando le aree nel giro di poche settimane. **Il sistema Dall'ol è altamente dinamico**, e può cambiare in pochi giorni o settimane. In pochi giorni si possono osservare cambiamenti della scala del centimetro nel livello dell'acqua dei vari laghi acidi. Quando la superficie di alcune aree si asciuga, l'attività geotermica può ricominciare mentre nuovi rifornimenti di fluidi alimentano i bacini esauriti. Pertanto, le vecchie caratteristiche geotermiche possono essere riattivate e nuovi depositi possono sovrapporsi a quelli antichi in un nuovo ciclo che porta alla confinamento di precedenti punti di emissione isolati.

Le salamoie del campo geotermico ed idrotermale di Dall'ol producono condizioni così estreme e singolari nel suo genere da essere limitanti per la vita (Belilla et al., 2019) e da attirare anche l'interesse scientifico degli **astrobiologi** che vi trovano una serie di parametri che creano un ambiente fisico e chimico unico e complesso. La coesistenza di tali caratteristiche fisico-chimiche estreme (pH, salinità, alta temperatura, mancanza di ossigeno, ecc.) rendono Dall'ol uno dei pochissimi **siti "poliestremisti"** sulla Terra, un sistema chiave per gli studi astrobiologici che indagano i limiti della vita. Il posto ideale dove cercare forme di vita (soprattutto batteri) con la capacità di prosperare in condizioni ambientali proibitive dette "estremofile", simili a quelle che poteva offrire, per esempio, Marte molto tempo fa. Sulla geologia di Dall'ol negli ultimi vent'anni sono state condotte molte ricerche ma studi sulla possibilità della vita a Dall'ol sono stati pubblicati solo negli ultimi anni. Fino a poco tempo fa si pensava che Dall'ol ospitasse condizioni troppo dure per la vita. In particolare un gruppo di ricerca francese e spagnolo affermava l'impossibilità di vita biologica a Dall'ol in quanto è un sito poliestremo controllato dal Ferro (Kotopoulou e al., 2019). Una recente ricerca ha dimostrato, invece, che in diversi luoghi del sistema idrotermale sono presenti phyla del Regno *Archaea* (suddivisione al più basso livello della vita cellulare che significa "batteri antichi") e batteri, sia estremofili che non (Cavalazzi et al., 2019), (Fig. 18).



**Fig. 18** - Immagini SEM di cellule (a sinistra) e biomorfi di silice (a destra) da Dall'ol. Le cellule microbiche possono essere facilmente confuse con i precipitati minerali ricchi di silice.









**Fig. 19, 20, 21, 22** – Fasi di campionamento (Dall'ol, 25 aprile 2011) da me effettuato col Prof. Mauro Rosi del DST dell'Università di Pisa richiesti dal ricercatore geochimico Orlando Vaselli del DST dell'Università di Firenze.





**Fig. 23, 24** – Fasi di campionamento a Dall'òl, (2008) del vulcanologo Dario Tedesco dell'Università di Napoli II mentre prende campioni di gas.



## Forme geotermiche ed idrotermali caratteristiche

Dal bordo meridionale della sommità della cupola di Dall'òl andando verso il suo centro, le aree geotermiche attive si estendono in un'area molto vasta. Si può identificare un'ampia varietà di caratteristiche geotermiche derivanti dalla precipitazione salina della salamoie troppo sature intorno alle sorgenti calde.

Illustrerò qui di seguito alcune delle forme più rappresentative tra le tantissime presenti nel sito di Dall'òl. Dal bordo meridionale del cratere al suo centro, le aree geotermiche attive si estendono ampiamente e presentano un'ampia varietà di caratteristiche geotermiche derivanti dalla precipitazione salina di salamoie troppo sature intorno alle sorgenti calde.

I più antichi depositi di sale sono completamente perforati da buchi e fratture generati dalla fuoriuscita dei gas, portando spesso al loro completo collasso. Nelle aree geotermiche attive nel centro del rilievo di Dall'òl, le strutture più comuni sono piccoli coni di sale formati attorno a geyser attivi o fumarole nella scala da cm a dm sebbene, occasionalmente, crescano per formarsi camini o pilastri alti fino ai 3 m (**Fig. 26, 27**).

I coni di sale di solito si raggruppano (**Fig. 28, 29**) e in seguito formano terrazze piatte associate a salamoie acide (**Fig. 30,31**) o terreni a vapore, a seconda che i coni di sale espellano acqua (geyser) o gas (fumarole).

**Fig. 25** – Nell'area sommitale in alcuni punti dove l'emissione dei vapori e gas vulcanici è più intensa si formano vasti campi fumarolici.







**Fig. 26, 27** - I rilievi e le concrezioni cristalline caratteristiche di Dall'òl si originano principalmente intorno alle bocche delle fumarole attive che depositano zolfo in grandi concentrazioni. Questi depositi di zolfo giallo e arancione si accumulano formando pinnacoli di varie altezze e a volte sono così imponenti che formano una sorta di “panettone” che può misurare oltrepassare i due metri di altezza.





**Fig. 28, 29** – Il raggruppamento di vari punti di emissione cuneiformi che in seguito formano terrazze piatte associate a salamoie acide.





**Fig. 30, 31** - I terrazzamenti con le piscine ricche di salamoie iperacide e ipersature esprimono colorazioni fantastiche passando dal giallo intenso (espressione dei composti ricchi in zolfo) all'arancione, marrone (per le parti più ricche in ferro) fino al verde e blu per le parti più ricche in fluoro e cloro.



Quando si sale verso la sommità della cupola di Dall'òl si incontra una vecchia area distante dall'area attualmente attiva, ricca dei resti di emissioni gassose, fumarole e antiche salamoie che ha lasciato numerose testimonianze dell'attività passata. Anche qui la natura si è sbizzarrita lasciando singolari strutture di sali uniche nel suo genere. Dai piccoli coni di pochi centimetri a strutture più grandi che possono in alcuni casi raggiungere i 3 metri di altezza e che per le fattezze ricordano gli *hornitos* vulcanici ma totalmente costituite da sali (**Fig. 32, 33 e 34**).





**Fig. 32, 33 e 34** – Le fumarole che hanno trasportato con se particelle di sali dagli strati sottostanti raffreddandosi a contatto con l'aria li hanno depositati intorno alla fessure di fuoriuscita dando origine poi a strutture sempre più grandi. Quando le fumarole e geyser diventano particolarmente importanti si depositano grandi quantità di materiali che fanno crescere delle strutture pinnacolari simili agli hornitos vulcanici ma costituiti di sale.



Si trovano poi altre due particolarissime formazioni non molto alte site all'interno di vecchie terrazze di salamoie ormai svuotate ma incredibili per le loro forme.

Le prime appena giunti sul bordo della sommità della collina di Dallòl, hanno la sorprendente fisionomia di biancastri funghi dalla cappella molto ampia e piatta caratterizzati dall'assenza di un gambo nate a ridosso del punto di fuoriuscita dei fluidi che li hanno depositi (**Fig. 35, 36**). Sono i resti di antiche attività di degassamento idrotermale intorno a punti di emissione perfettamente verticali che hanno depositato in modo radiale le particelle di sali evaporitici che si sono poi solidificate dando origine a queste strane formazioni di alcune decine di centimetri fino ad oltre un metro di diametro. Le seconde, anch' esse all'interno di una antica salamoia e collocate a pochi metri dalle precedenti formazioni, hanno forme rossastre simili infiorescenze oppure ricordano un prato di coralli marini (**Fig. 37, 38**). Queste altre particolarissime forme e sono legate alle attività di degassamento idrotermale intorno a punti di emissione orientati che hanno depositato le particelle di sali evaporitici dando origine a queste forme bizzarre tutte inclinate dalla stessa parte.





**Fig. 35, 36** – Le “formazioni a fungo” frutto di emissioni verticali di fluidi caldi e la conseguente deposizioni radiali dei sali contenuti immediatamente raffreddati alla loro uscita.





**Fig. 37, 38** – Le “formazioni a coralli marini” frutto di emissioni orientate di fluidi caldi e la conseguente deposizioni dei sali molto ricchi in ferro immediatamente raffreddati alla loro uscita.

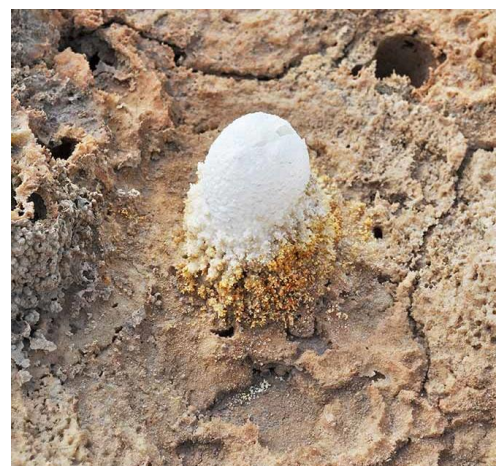


Tra le molteplici morfologie che si possono trovare a Dall'òl sono state fotografate anche numerose formazioni precipitate uniche tra cui, strutture simili a fiori, strutture simili a gusci d'uovo, sferule (**Fig. 39, 40**). Infatti, intorno a piccole fumarole e sfiatatoi si sono depositati i sublimati di zolfo e allumina con sottilissime e fragili forme rotondeggianti che ricordano gusci di uova o sferule. Altre invece deposte in spesse croste incrinate e divise in poligoni più o meno irregolari (**Fig. 41, 42**).



**Fig. 39,40** – Le rotondeggianti e fragilissime forme di alcuni punti di emissione

Questo incredibile sito geologico di Dall'òl per le sue singolarissime unicità dovrebbe essere tutelato in maniera diversa rispetto all'attuale situazione che lo ha inserito nella concessione minerarie della società canadese *Allana Potash* oggi controllata dai Cinesi. Alla Conferenza *Magmatic Rifting & Active Volcanism* tenutasi ad Addis Abeba nel gennaio 2012, insieme ad geologi inglesi e australiani proponemmo al governo etiopico la trasformazione dell'area in un grande geo-parco comprendente anche l'area vulcanica del massiccio dell'Erta Ale (altro luogo unico al mondo per i suoi laghi di lava). Chiaramente le entrate che potrebbero dare flussi turistici



ad oggi sono molto inferiori a quelle garantite dall'estrazione mineraria dei sali potassici quindi la proposta è rimasta lettera morta. Infine, il sito di Dall'òl per la sua eccezionale e particolarissima natura dovrebbe essere inserito quanto prima nella lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO.





**Fig. 41, 42** – Terrazzamenti delle salamoie e superfici fratturate tipiche di Dallòl.



## Testi citati e consultati

- Barberi F., Borsi S., Ferrara G., Marinelli G., Santacroce R., Tazieff H. and J.Varet. (1972) - *Evolution of the Danakil depression (Afar, Ethiopia) in light of radiometric age determinations*. J. Geol., 80: 720-729.
- Barberi F. and Varet J. (1970) - *The Erta Ale Volcanic Range (Danakil Depression, Northern Afar, Ethiopia)*. Bollettino Vulcanologico , 34 (4): 848-917.
- Bastow I. D., Booth A. D., Corti G., Keir D., Magee C., Jackson C. A. L., Warren J., Wilkinson J., Lasciari M., (2018) - *The development of late-stage continental breakup: seismic reflection and borehole evidence from the Danakil Depression, Ethiopia*. Tectonics, 37: 2848-2862.
- Behle A., Makris J., Baier B. and Delibassis N. (1975) - *Salt thickness near Dallol (Ethiopia) from seismic reflection measurements and gravity data*. Afar Depress. Ethiopia, 1: 156-167.
- Belilla J., Moreira D., Jardillier L., Reboul G., Benzerara K., López-García J. M., Bertolino P., Lopez-Archilla A. I., and Lopez-Garcia P., (2019) - *Hyperdiverse archaea near life limits at the polyextreme geothermal Dallol area*. Nat. Ecol. Evol., 3: 1552-1561.
- Bonatti E., Cipriani A. and Lupi L. (2015) - *The Red Sea: The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin*. N. M. A. Rasul and I. C. F. Stewart eds. Heidelberg, Springer-Verlag, 29-44.
- Bonatti E., Emiliani C., Ostlung G. and Rydell H. (1971) - *Final desiccation of the Afar Rift, Ethiopia*. Science, 172: 468-469.
- Carniel R., Jolis E. M. and Jones J. (2010) - *A geophysical multi-parametric analysis of hydrothermal activity at Dallol, Ethiopia*. J. Afr. Earth Sci., 58: 812-819.
- Cavalazzi B., Barbieri R., Gómez F., Capaccioni B., Olsson-Francis K., Pondrelli M. Rossi A.P., Hickman-Lewis K., Agangi A., Gasparotto G., Glamoclija M., G.G. Ori, N. Rodriguez, and M. Hagos (2019) - *The Dallol geothermal area, northern Afar (Ethiopia) - an exceptional planetary field analog on earth*. Astrobiology, 19: 553-578.
- CNR-CNRS Afar Team (1973) - *Geology of northern Afar (Ethiopia)*. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn, 15: 443-490.
- Collet B., Taud H., Parrot J. F., Bonavia F. and Chorowicz J. (2000) - *A new kinematic approach for the Danakil block using a Digital Elevation Model representation*. Tectonophysics, 316: 343-357.
- Corti G., Bastow I. D., Keir D. and Pagli C. (2015) - *Rift-related morphology of the Afar Depression*. In: Landscapes and Landforms of Ethiopia, ed. P. Billi, Dordrecht Springer Science+Business Media, 251-274.
- Darrah T. H., Tedesco D., Tassi F., Vaselli O., Cuoco E. and Poreda R. J. (2013) - *Gas chemistry of the Dallol region of the Danakil Depression in the Afar region of the northern-most East African Rift*. Chem. Geol., 339: 16-29.
- Edelmann J. and Roscoe R. (2010) - *Volcano tourism in Ethiopia and the Danakil Rift Zone*. In: Volcano and Geothermal Geotourism, Sustainable Geo-Resources for Leisure and Recreation, P. Erfurt-Cooper and M. Cooper eds, Abingdon, Taylor and Francis, 59-67.
- ERCOSPLAN (2010) - *Technical Report and Current Resource Estimate*. In: Danakil Potash Deposit, Afar State/Ethiopia. Project Reference EGB 08-024, Erfurt ERCOSPLAN.
- ERCOSPLAN (2011) - *Preliminary Resource Assessment Study*. In: Danakil Potash Deposit, Afar State/Ethiopia. Erfurt ERCOSPLAN.
- Franzson H., Helgadóttir H. M. and Óskarsson, F. (2015) - *Surface exploration and first conceptual model of the Dallol geothermal area, northern Afar, Ethiopia*. In: Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, 11.
- Gonfiantini R., Borsi S., Ferrara G. and Panichi C. (1973) - *Isotopic composition of waters from the Danakil depression (Ethiopia)*. Earth Planet. Sci. Lett., 18: 13-21.
- Holwerda J. G. and Hutchinson R. W. (1968) - *Potash-bearing evaporites in the Danakil area, Ethiopia*. Econ. Geol., 63: 124-150.



Hovland M., Rueslåtten H. G., Johnsen H. K., Kvamme B. and Kuznetsova T. (2006) - *Salt formation associated with sub-surface boiling and supercritical water*. Mar. Pet. Geol., 23: 855-869.

Hutchinson R. W. and Engels G. G. (1970) - *Tectonic significance of regional geology and evaporate lithofacies in northeastern Ethiopia*. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 267: 313-329.

Jamtveit B., Svensen H., Podladchikov Y. Y. and Planke S. (2004) - *Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 234: 233-241.

Keir D., Bastow I. D., Pagli C. and Chambers E. L. (2013) - *The development of extension and magmatism in the Red Sea rift of Afar*. Tectonophysics, 607: 98-114.

Kotopoulou E., Delgado Huertas A., Garcia-Ruiz J. M., Dominguez-Vera J. M., Lopez-Garcia J. M., Guerra-Tschuschke I., Rull F., (2019) - *Apolyextreme hydrothermal system controlled by iron: the case of Dallol at the Afar Triangle*. ACS Earth Space Chem., 3: 90-99. doi: 10.1021/acsearthspacechem.8b00141

López-García J. M, Moreira D., Benzerara K., Grunewald O., López-García P. (2020) - *Origin and Evolution of the Halo-Volcanic Complex of Dallol: Proto-Volcanism in Northern Afar (Ethiopia)*. Frontiers in Earth Science, Frontiers Media.

Lupi L. (2009) - *Dancalia. L'esplorazione dell'Afar, un'avventura italiana*. Tagete edizioni\IGM, Pontedera, 1-2.

Lupi L. (2012) - *Afar Region, Dancalia, geological and route map 1: 950.000*. Litografia Artistica Cartografica, Firenze.

MacDonald G. J. F. (1953) - *Anhydrite gypsum equilibrium relations*. Am. J. Sci., 251: 884-898.

Nobile A., Pagli C., Keir D., Wright T. J., Ayele A., Ruch J., Acocella V., (2012) - *Dike-fault interaction during the 2004 Dallol intrusion at the northern edge of the Erta Ale Ridge (Afar, Ethiopia)*. Geophys. Res. Lett. 39: 2-7.

Pedgley D. E. (1967) - *Air temperature at Dallol, Ethiopia*. Meteorol. Mag., 96: 265-270.

Tadiwos C. (2013) - *Dallol volcano and Danakil depression?: earth resources and geo-hazards*. In: Proceedings of the 24th Colloquium of African Geology and 14th Congress of Geological Society of Africa, Aveiro.

Talbot C. J. (2008) - *Hydrothermal salt-but how much?* Mar. Pet. Geol., 25: 191-202.

Tesfaye S., Harding D. J. and Kusky T. M. (2003) - *Early continental breakup boundary and migration of the Afar triple junction, Ethiopia*. GSA Bull., 115: 1053-1067.

Varet J. (2010) - *Contribution to favorable geothermal site selection in the Afar triangle*. In: Proceedings of the ARGEO-C3 Third East African Rift Geothermal Conference, Djibouti, 139-155.

Varet J. (2018) - *Recent and active units of the Danakil Sea (Dagad Salt Plain) and Afdera Lake*. In: Geology of Afar (East Africa), Cham Springer International Publishing, 205-226.

Warren J. K. (2015a) - *Danakhil Potash, Ethiopia: Beds of Kainite/Carnallite, Part 2 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Warren J. K. (2015b) - *Danakhil Potash; Ethiopia - Modern Hydrothermal and Deep Meteoric KCl, Part 3 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Warren J. K. (2015c) - *Danakil Potash: K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Across the Neogene: Implications for Danakhil Potash, Part 4 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Wunderman R. (2013) - *Report on Dallol (Ethiopia)*. In: Bulletin of the Global Volcanism Network, 38, ed. R. Wunderman, (Washington, DC: Smithsonian Institution).