

I GESSI DI TOSSIGNANO, UNA STORIA STRAORDINARIA

STEFANO LUGLI¹, VINICIO MANZI², MARCO ROVERI³

Riassunto

Lo studio della Vena del Gesso a Tossignano a partire dagli anni '60 del secolo scorso ha aperto la strada alle ricerche che hanno permesso di definire le caratteristiche della prima fase della Crisi di Salinità del Messiniano, la catastrofe geologica che ha coinvolto il bacino del Mediterraneo tra 5,97 e 5,33 milioni di anni fa. Le caratteristiche geologiche dei gessi rappresentano una straordinaria testimonianza dell'evoluzione geologica e della storia della vita del nostro pianeta e contribuiscono in modo fondamentale a rendere i fenomeni carsici evaporitici dell'Appennino settentrionale unici al mondo, degni candidati all'iscrizione nella lista del patrimonio mondiale dell'umanità dell'UNESCO.

Parole chiave: evaporiti, gessi, Crisi di Salinità messiniana, Vena del Gesso.

Abstract

The study of the Messinian Gypsum outcrop of the Vena del Gesso at Tossignano (Northern Italy), starting from the '60s of the last century, paved the way for the various research lines that allowed to define the characteristics of the first phase of the Messinian salinity crisis, the geological catastrophe that involved the Mediterranean basin between 5.97 and 5.33 million years ago. The characteristics of gypsum represent outstanding examples of the geological evolution of our planet and contribute in a fundamental way to making the evaporite karst phenomena of the Northern Apennines unique, worthy candidates for the inclusion in the UNESCO's world heritage list.

Keywords: *Evaporites, Gypsum, Messinian Salinity Crisis, Vena del Gesso.*

Introduzione: rocce straordinarie

Il paesaggio dei Gessi di Tossignano rappresenta una delle immagini più iconiche della storia geologica dell'Appennino. Qui la Vena del Gesso appare nella sua espressione morfologica più spettacolare, conosciuta in tutto il mondo. Una dorsale bordata da una ripida scarpata che mette in luce spessi strati costituiti da innumerevoli cristalli luccicanti di gesso (fig. 1). Questa "vena" riveste un interesse di risonanza mondiale per quanto riguarda lo studio delle evaporiti perché ha permesso di far luce su uno degli sconvolgimenti geologici più drammatici nella storia del nostro pianeta, la Crisi di Salinità del Messiniano. Qui negli anni settanta del secolo scorso sono state gettate le basi per lo studio moderno di queste enigmatiche rocce. A quei tempi si pensava che i cristalli formati per evaporazione dell'acqua marina fossero dei semplici precipitati chimici che poi subivano complesse trasformazioni e ricristallizzazioni. Nella Vena del Gesso di Tossignano si è dimostrato per la prima vol-

ta che anche per i depositi chimici valgono le regole della sedimentologia: negli strati si possono leggere i ritmi delle stagioni, l'azione delle correnti e l'attività delle pochissime forme di vita in grado di resistere alle elevatissime salinità di questi ambienti estremi e inospitali. Queste considerazioni non erano per nulla scontate perché le evaporiti sono rocce difficili da interpretare. Uno dei motivi di questa difficoltà è che sul nostro pianeta oggi abbiamo pochissimi esempi che possiamo studiare per confrontarli con i depositi antichi. E i pochi esempi di bacini evaporitici naturali attivi oggi sono tutti a scala molto ridotta rispetto all'enorme vastità dell'intero Mediterraneo. Non è quindi semplice comprendere i complessi fenomeni che hanno trasformato il nostro mare in una enorme salina con la deposizione di oltre 2 km di spessore di sedimenti evaporitici in certe zone.

L'interpretazione moderna di queste rocce è cominciata proprio qui nella Vena del Gesso, grazie al lavoro di due geologi italiani tra i più noti a livello internazionale: Franco Ricci Lucchi e Gian Battista

¹ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Via Campi 103, 41125 Modena (MO) - stefano.lugli@unimore.it

² Università di Parma, Unità Scienze della Terra, Parco Area delle Scienze 157/A, 43124 Parma (PR) - vinicio.manzi@unipr.it

³ Università di Parma, Unità Scienze della Terra, Parco Area delle Scienze 157/A, 43124 Parma (PR) - marco.roveri@unipr.it



Fig. 1 – Geologia della Vena del Gesso nella Riva di San Biagio vista dalla Rocca di Tossignano. È indicata la numerazione progressiva degli strati gessosi. Gli strati basali 1 e 2 non affiorano, ma sono visibili nelle gallerie dell'ex cava Spes (vedi contributo in proposito di LUGLI, in questo stesso volume) (foto S. Lugli).

Vai. In precedenza Leo Ogniben, nella prima monumentale e pionieristica descrizione petrografica della successione evaporitica del Mediterraneo, aveva paragonato le rocce evaporitiche alle rocce metamorfiche (OGNIBEN 1957). Solo i piccoli cristalli di gesso (microcristallino) venivano considerati di origine primaria mentre tutti quelli di grandi dimensioni sembravano derivare dalla trasformazione di un altro minerale, l'anidrite. Questa interpretazione, che oggi sappiamo errata, aveva influenzato le ricerche per lungo tempo. Appariva impossibile che cristalli lunghi anche più di due metri, come quelli che troviamo nella Vena del Gesso, potessero formarsi direttamente per evaporazione dell'acqua di mare e non per effetto di altri fenomeni legati alle temperature e delle pressioni che si sviluppano nel sottosuolo dopo la sedimentazione. L'idea che cristalli così grandi e ordinati, tutti orientati nella stessa direzione verticale, si fossero formati per evaporazione dell'acqua marina era del tutto rivoluzionaria nel panorama italiano. Nuove idee avevano già fatto una prima comparsa con la descrizione dei gessi della Sicilia da parte di HARDIE, EUGSTER (1971)

e SCHREIBER (1973), ma è nella Vena del Gesso che viene descritta per la prima volta l'intera successione stratigrafica (PAREA, RICCI LUCCHI 1972) e viene proposto un modello deposizionale in parte valido ancora oggi (VAI, RICCI LUCCHI 1977), poi aggiornato ed esteso all'intero bacino Mediterraneo, dalla Sicilia a Cipro, alla Spagna, all'Algeria fino ad Israele (ROVERI *et alii* 2003; ROVERI *et alii* 2006; LUGLI *et alii* 2010).

È sempre dallo studio di queste zone che si è aggiunto un altro pilastro fondamentale per la comprensione della evoluzione degli ambienti evaporitici: la descrizione dei filamenti, gli "spaghetti" intrappolati all'interno dei cristalli di gesso (VAI, RICCI LUCCHI 1977). Si tratta di una scoperta sensazionale, il primo caso di fossilizzazione in gesso mai descritto al mondo, cui poi è seguita l'analisi del materiale genetico, l'esempio più antico mai studiato fino ad oggi (PANIERI *et alii* 2010).

E per finire, gli studi più recenti hanno dimostrato che il bacino della Vena del Gesso faceva parte del più esteso bacino marginale di tutta la Crisi di Salinità del Mediterraneo (MANZI *et alii* 2020). Infatti nell'area

adriatica la deposizione delle evaporiti gessose raggiungevano una estensione complessiva di addirittura 30.000 km².

Lo studio dei Gessi di Tossignano ha quindi aperto numerose linee di ricerca che hanno permesso di far luce su uno degli sconvolgimenti geologici più drammatici e spettacolari nella storia del nostro pianeta, la Crisi di Salinità del Messiniano. Nella Vena del Gesso della zona di Tossignano sono racchiusi tutti i segreti geologici della prima fase della crisi che ha coinvolto l'intero bacino del Mediterraneo. Prima di tutte queste entusiasmanti scoperte l'origine dei gessi e i loro rapporti con le rocce carbonatiche (Calcare di base) e con il sale e gli altri gessi che si trovano sul fondo del Mediterraneo erano sconosciuti (ROVERI *et alii* 2014b). Ma qui possiamo studiare anche un altro fenomeno meno conosciuto, la trasformazione del gesso in anidrite che si trasforma a sua volta di nuovo in gesso. Si tratta di un processo che può cancellare le tracce della roccia originaria, ma che rappresenta una fase fondamentale dei complessi fenomeni che governano la formazione dello zolfo (ROSSI *et alii* 2021).

In questo articolo illustriamo le straordinarie caratteristiche geologiche dei gessi della Vena che contribuiscono in maniera fondamentale a rendere i fenomeni carsici dell'Appennino settentrionale unici al mondo, degni candidati all'iscrizione nella lista del patrimonio mondiale dell'umanità dell'UNESCO (AA.VV. 2022).

La Crisi di Salinità messiniana: il Mediterraneo si è disseccato oppure no?

La Crisi di Salinità messiniana è l'evento più drammatico della storia del Mare Mediterraneo. Si tratta di una vera e propria catastrofe ecologica che provocò la scomparsa di quasi tutte le forme di vita dal nostro mare. Tra 5,97 e 5,33 milioni di anni fa (Messiniano, Miocene superiore) il Mediterraneo si trasformò in una di enorme salina. Lo spostamento della placca africana verso quella Euro-asiatica provocò la riduzione dello Stretto di Gibilterra e il bilancio idrico negativo che ancora oggi caratterizza il nostro mare a causa dell'intensa evaporazione non fu più compensato dal flusso in entrata dall'Oceano Atlantico. La salinità aumentò drasticamente fino alla cristallizzazione dei minerali evaporitici. Le acque estremamente salate furono poi sostituite da acque dolci e salmastre e il nostro mare diventò un vero e proprio "Lago Mare". Le straordinarie condizioni anomale della Crisi di Salinità si protrassero per circa 640 mila anni e determinarono la formazione di oltre un milione di chilometri cubi di gesso e sale nelle aree marginali e nei bacini

più profondi (ROVERI *et alii* 2014a).

Ma il nostro mare si è prosciugato oppure no? Nonostante l'ipotesi del disseccamento completo appaia estremamente affascinante e si presti ottimamente ai vari filoni della divulgazione sensazionalistica, essa non appare reggere il confronto con i dati scientifici. Le modalità che innescarono e che posero fine alla Crisi di Salinità sono ancora oggi al centro di controversie scientifiche iniziate cinquant'anni fa. Il principale tema di discussione riguarda l'entità della caduta del livello del mare. L'ipotesi del totale disseccamento prevede la chiusura delle connessioni marine con l'Oceano Atlantico, con un abbassamento del livello del Mediterraneo di oltre 1500 metri (Hsü *et alii* 1973). La fine dell'evento sarebbe poi stata segnata dal catastrofico cedimento della "diga" di Gibilterra che avrebbe determinato il veloce riempimento del bacino (RYAN *et alii* 2009; MICALLEF *et alii* 2018). Tuttavia, gli studi stratigrafici, tettonici, geochemici e paleoambientali degli ultimi anni consentono di formulare una ipotesi alternativa (MANZI *et alii* 2005; MANZI *et alii* 2007; LUGLI *et alii* 2013; LUGLI *et alii* 2015; ROVERI *et alii* 2014b, 2014c; ROVERI *et alii* 2016; GVIRTZMAN *et alii* 2017; MANZI *et alii* 2018; MANZI *et alii* 2021). Proprio grazie a dati raccolti anche nella Vena del Gesso si può evidenziare che il bacino del Mediterraneo fu sempre occupato da un corpo d'acqua profondo connesso con l'Atlantico per tutta la durata della crisi, anche se in modo limitato (si veda ROVERI *et alii* 2014a per una discussione sulla controversia scientifica).

L'architettura cronologica e stratigrafica dei sedimenti della crisi è ormai comunemente accettata e condivisa da gran parte della comunità scientifica (CIESM 2008; ROVERI *et alii* 2014a). Lo schema cronostratigrafico suddivide la crisi in tre fasi distinte sviluppate in modo sincrono nelle aree marginali e nei contesti profondi del Mediterraneo (MANZI *et alii* 2013; MANZI *et alii* 2018; REGHIZZI *et alii* 2019):

Fase 1 (5,97-5,60 milioni di anni fa)

L'inizio della Crisi di Salinità è reso evidente dalla riduzione e successiva scomparsa dei microfossili marini (foraminiferi e gran parte del nannoplancton) a causa dell'aumento di salinità delle acque, ma non coincide necessariamente con la deposizione di sedimenti evaporitici. Nelle aree marginali poco profonde, simili a lagune, si formarono strati di cristalli di selenite cresciuti sul fondo: i Gessi Inferiori Primari (*Primary Lower Gypsum* – PLG; ROVERI *et alii* 2008; LUGLI *et alii* 2010). Nello stesso momento nelle zone profonde al posto dei gessi si deponevano calcari dolomitici e argille prive di fossili (MANZI *et alii* 2007; MANZI *et alii* 2018).

Fase 2 (5,60-5,54 milioni di anni fa)

La seconda fase fu quella caratterizzata da condizioni di maggior aridità, ma fu anche la più breve. Una fase tettonica sviluppata in tutto il Mediterraneo provocò il sollevamento delle aree poco profonde che furono erose dando luogo alla superficie erosiva messiniana (*Messinian Erosional Surface* - MES). Le evaporiti primarie deposte precedentemente furono erose e ridepositate sotto forma di enormi blocchi (olistoliti; MANZI *et alii* 2021) e flussi gravitativi sottomarini (torbiditi, LUGLI *et alii* 2013). Enormi volumi di gessi clastici vennero depositi nella Romagna orientale formando i Gessi Inferiori Risedimentati (*Resedimented Lower Gypsum* - RLG; PAREA, RICCI LUCCHI 1972; MANZI *et alii* 2005; ROVERI *et alii* 2008a). Solo nelle parti più profonde del Mediterraneo si verificò la deposizione primaria di sale con spessori di oltre due chilometri (LUGLI 1999; LUGLI *et alii* 1999; MANZI *et alii* 2012).

Fase 3 (5,54-5,33 milioni di anni fa)

Durante l'ultima fase della crisi il Mar Mediterraneo assunse caratteristiche idrologiche ed ecologiche completamente diverse. Mentre in Sicilia, Grecia e Cipro furono deposte evaporiti primarie, i Gessi Superiori (*Upper Gypsum* - UG; MANZI *et alii* 2009), in altre aree come la Spagna e l'Appennino settentrionale si alternarono depositi fluvio-deltizi grossolani e calcari di ambiente lacustre (Formazione a Colombacci; BASSETTI *et alii* 2004; ROVERI *et alii* 2008a). Le faune e flore fossili tipiche di ambiente ipoalino suggeriscono

una diluizione significativa dell'intero Mediterraneo, che si trasformò in una sorta di enorme lago salmastro, il Lago Mare. La fine di questa fase è segnata dall'improvviso ritorno alle condizioni marine normali in modo sincrono in tutto il Mediterraneo (GENNARI *et alii* 2008; ROVERI *et alii* 2008a).

Al di sotto e al di sopra della Vena del Gesso: evoluzione tettonico-sedimentaria

La zona di Tossignano è il luogo più spettacolare dove è possibile comprendere l'evoluzione sedimentaria dell'Appennino settentrionale prima, durante e dopo la Crisi di Salinità. Il colpo d'occhio dai ruderi della Rocca (fig. 1) e dal cortile del Palazzo Baronale (fig. 2), prossima sede del Museo Geologico, permette di osservare una sezione naturale che abbraccia tutte le formazioni geologiche al di sotto e al di sopra dei gessi.

Al di sotto dei gessi sono presenti due unità, la Formazione Marnoso-arenacea (Langhiano-Messiniano), costituita dalle caratteristiche alternanze di strati di arenaria e argilla deposte da torbiditi generate da frane sottomarine di provenienza alpina e in solo in parte centro appenninica. Le torbiditi sono seguite da una unità di alcune decine di metri di spessore di argille ricche di materia organica, le argille eusiniche (Tortoniano superiore - Messiniano inferiore), deposte appena prima dei gessi (ROVERI *et alii* 2003; MANZI *et alii* 2007; REGHIZZI *et alii* 2019).



Fig. 2 – Geologia della Vena del Gesso guardando verso ovest dalla terrazza dell'istituendo Museo geologico di Tossignano. L'angolazione permette di apprezzare come la Vena sia costituita da enormi blocchi accatastati e parzialmente ruotati per scivolamento sul fondo dell'antico mare Messiniano. Nell'immagine è indicata anche la numerazione progressiva degli strati gessosi (foto P. Lucci).

Al di sopra, la Vena del Gesso è sigillata dalla deposizione della Formazione a Colombacci (Messiniano superiore), formata da sedimenti clastici e calcari, depositati in acque dolci o salmastre durante la fase finale della Crisi di Salinità, la fase Lago Mare (ROVERI *et alii* 2008a). Nella zona di Tossignano la Formazione a Colombacci non è ben visibile, ma affiora in giacitura spettacolare nel Parco museo geologico cava Monticino, vicino Brisighella (MARABINI, VAI 1989; LUGLI *et alii* 2015). Al di sopra della Formazione a Colombacci troviamo la Formazione delle Argille Azzurre (Pliocene Inferiore), costituita da sedimenti di mare relativamente profondo, la cui deposizione marca il ritorno alle condizioni marine normali al termine della crisi. Le Argille Azzurre sono ben riconoscibili per le estese forme calanchive che caratterizzano il paesaggio al di sopra dei gessi.

La deposizione di questi sedimenti è legata all'evoluzione tettonica dell'Appennino settentrionale. Sin da oltre 7 milioni di anni fa, al passaggio Messiniano/Tortoniano, i movimenti tettonici separarono progressivamente l'avanfossa appenninica in diverse zone (RICCI LUCCHI 1986; ROVERI *et alii* 2003). La fase deformativa proseguì anche durante il Messiniano inferiore formando alti strutturali che provocarono la riduzione progressiva degli apporti torbidity della Marnoso-arenacea. Il sollevamento delle strutture tettoniche, come l'anticlinale di Riolo sepolta nell'area a nord di Tossignano, determinarono la formazione di bacini di semi isolati e poco profondi adatti alla precipitazione dei gessi. Il progressivo sollevamento tettonico dei bacini evaporitici provocò l'esposizione subaerea e l'erosione dei gessi, che furono in parte risedimentati nelle depressioni strutturali e topografiche dell'avanfossa, sul fronte della catena appenninica in sollevamento (ROVERI *et alii* 1998; ROVERI *et alii* 2003; ROVERI *et alii* 2008a; MANZI *et alii* 2005; ROVERI, MANZI 2006). A questi eventi seguì una fase di relativa stasi tettonica che, unita alla generale subsidenza, permise lo sviluppo di una successione di tipo trasgressivo, culminata con l'ingressione marina pliocenica e la deposizione delle Argille Azzurre. Per tutta la durata del Pliocene e del Pleistocene, fino ai giorni nostri, la modesta attività tettonica ha comportato la deformazione delle strutture formate nelle fasi precedenti.

Cristalli giganteschi, "spaghetti" e "goccioline" di acqua di mare

I cristalli di gesso della Vena presentano numerosi aspetti straordinari. Primo tra questi è la notevole dimensione dei cristalli che negli strati basali supera

il metro e potrebbero anche raggiungere 4 metri nel caso di alcuni individui fratturati (LUGLI 2019a). Il secondo aspetto straordinario è la presenza di filamenti e di "goccioline" di acqua di mare all'interno dei cristalli.

I cristalli di selenite sono semitrasparenti ma la zona centrale è torbida, ricca di filamenti di organismi che vivevano sul fondo del bacino e venivano intrappolati durante la crescita. La loro forma filamentosa ricorda quella degli spaghetti. Notati per la prima volta da Bob ("Luigi") Folk, figura leggendaria della sedimentologia mondiale, gli "spaghetti", furono presentati alla comunità scientifica internazionale in un congresso nel 1975 da G.B. Vai e F. Ricci Lucchi e furono descritti in modo dettagliato nella loro pubblicazione del 1977. È questo un caso eccezionale di fossilizzazione in gesso di cianobatteri (PANIERI *et alii* 2010) e/o di batteri solfuro-ossidanti (DELA PIERRE *et alii* 2015). L'ottimo stato di preservazione della materia organica ha permesso di analizzare il materiale genetico dei cianobatteri, il più antico esempio fino ad oggi mai rilevato. Solo questi microrganismi e pochi altri erano in grado di sopravvivere alle elevate salinità del Mediterraneo durante la Crisi di Salinità poco meno di sei milioni di anni fa.

Oltre alla materia organica e altri solidi, tutti i tipi di cristalli crescendo possono intrappolare parte del fluido dal quale stanno precipitando. Sulla superficie dei cristalli possono infatti formarsi delle microscopiche cavità (cristalli negativi) che prendono il nome di inclusioni fluide. Nel caso dei minerali evaporitici come il gesso, il fluido è costituito da acqua di mare concentrata dall'evaporazione (salamoia). Le inclusioni fluide sono importantissime perché rappresentano vere e proprie goccioline di acqua di mare del Mediterraneo giunte intatte fino a noi. Lo studio di queste goccioline ci permette di comprendere varie caratteristiche della salamoia dalla quale precipitavano i cristalli, per esempio il suo grado di salinità e la sua evoluzione nel tempo.

I risultati preliminari di alcuni studi avevano rivelato che l'acqua contenuta nei cristalli presenta una salinità molto bassa, più vicina a quella di un fiume o di un lago che a quella dell'acqua di mare. Perché questo sia possibile bisognerebbe immaginare che in una prima fase sia avvenuta la deposizione dei cristalli dall'acqua marina e poi con un abbassamento del livello del mare (o un sollevamento tettonico del bacino) i gessi possano essere stati erosi e disciolti da corsi d'acqua e finalmente ri-depositati ancora una volta per evaporazione, ma stavolta in un ambiente dominato da acque continentali a bassa salinità. Questo tipo di evoluzione che potrebbe verificarsi in zone limitate appare piuttosto difficile da immaginare per

tutto il Mediterraneo. Un'altra possibilità ancora più affascinante potrebbe essere legata alla mediazione dei filamenti batterici che potrebbero aver promosso l'accrescimento dei cristalli in condizioni del tutto anomale rispetto a quelle conosciute. Sappiamo che il gesso può assumere forme cristalline diverse in funzione di composizione, temperatura e contenuto in sostanze organiche della soluzione dalla quale precipita (CODY, CODY 1988). Ma ancora una volta immaginare che questi fenomeni possano aver coinvolto l'intero Mediterraneo formando centinaia di metri di spessore di cristalli anomali risulta improbabile. Questa sorta di "eccezione" nei meccanismi di crescita dei minerali evaporitici non è mai stata riscontrata e verificata fino ad oggi. Ma i gessi si sono quindi formati da acque poco salate? I risultati dei nuovi studi sulle inclusioni fluide hanno smentito questa possibilità (BIGI *et alii* 2022). L'applicazione di un nuovo metodo sperimentale ha permesso di verificare che in realtà i fluidi intrappolati nei cristalli di gesso durante la crescita oltre all'acqua poco salata contengono anche acqua di mare salata. Salata al punto giusto per far formare il gesso nelle stesse condizioni di evaporazione che oggi vediamo nelle saline di Cervia o Trapani. Il dato anomalo è invece la coesistenza dentro ai cristalli messiniani di acqua salata insieme all'acqua dolce. Questo si può spiegare solo con l'azione di fenomeni avvenuti successivamente alla deposizione. I cristalli di gesso possono aprirsi leggermente lungo i piani di

sfaldatura e poi rinsaldarsi senza lasciare traccia della "ferita rimarginata". Nella zona ricresciuta però le goccioline intrappolate sono quelle dell'acqua presente al momento della richiusura della "ferita", quindi acque più recenti e meno salate. La proprietà mineralogica dei cristalli di gesso di essere separati lungo piani perfettamente lisci e regolari (piani di sfaldatura) è quella sfruttata dai romani per suddividere facilmente i cristalli in lastre sottilissime, addirittura inferiori a 2 mm di spessore, per poi utilizzarle delle finestre al posto dei vetri, il famoso *lapis specularis* (LUGLI *et alii* 2015; LUGLI 2019). Questa caratteristica cristallografica ha probabilmente determinato il microscopico sfaldamento dei cristalli quando la Vena del Gesso è stata sepolta da centinaia di metri di spessore di Argille Azzurre. E anche successivamente, quando i sedimenti al di sopra dei gessi sono stati erosi e la Vena è rimasta esposta sul margine appenninico. Gli studi più recenti hanno quindi aggiunto nuove informazioni scientifiche che rimarcano in modo ancora più spettacolare le straordinarie caratteristiche geologiche dei cristalli di gesso e la sorprendente storia geologica della Vena del Gesso.

Gli strati gessosi e i parametri astronomici

Uno degli aspetti che salta subito all'occhio osservando la scarpata della Vena del Gesso è l'organizzazione

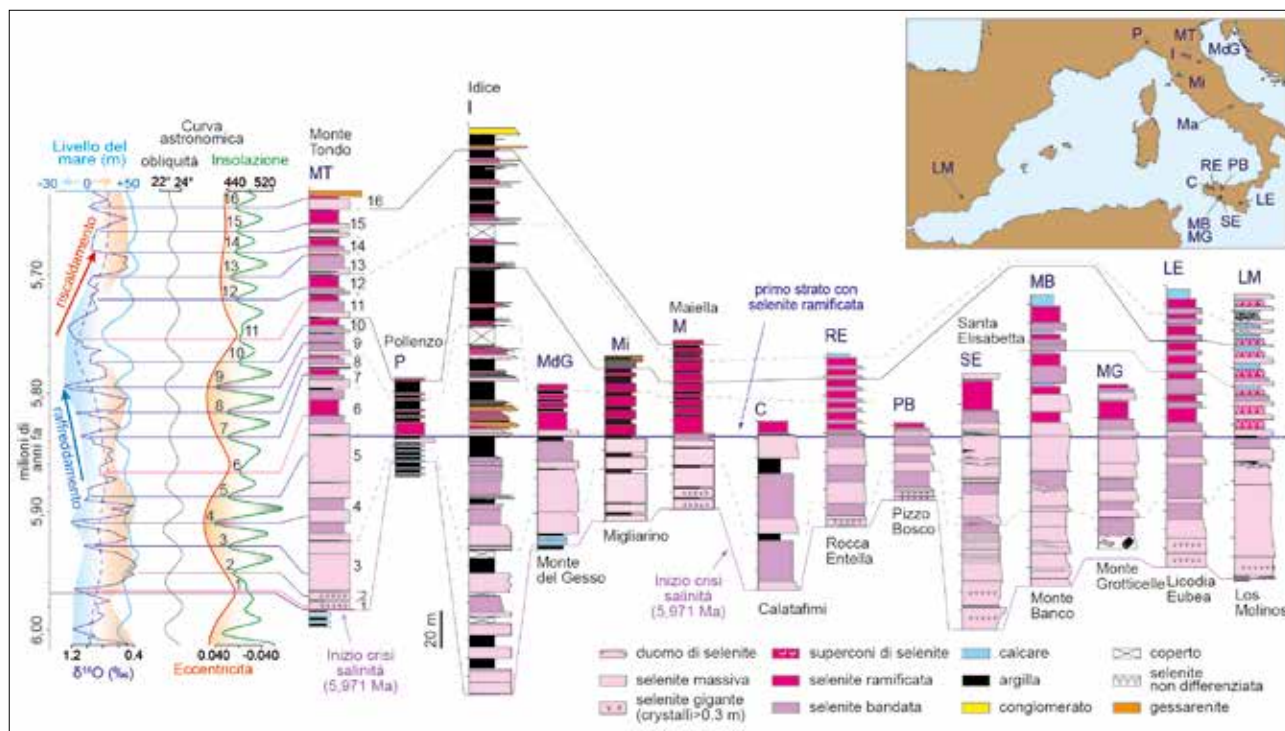


Fig. 3 – Nella Vena del Gesso e in altre parti del Mediterraneo i 16 strati gessosi e le argille che li separano sono stati depositi in seguito alle variazioni climatiche naturali descritte dalla curva dell'insolazione, causate del fenomeno astronomico della precessione degli equinozi (semplificato da LUGLI *et alii* 2010).

in spessi strati separati da sottili livelli di argilla della Formazione Gessoso-solfifera (fig. 3). Sono 16 gli strati di gesso che compongono la Vena, i primi due, raramente visibili sono i più sottili, mentre il terzo il quarto il quinto e il sesto sono i più spessi. I gessi si sono formati nelle fasi climatiche aride della Crisi di Salinità, quando la forte evaporazione dell'acqua marina permetteva la cristallizzazione dei minerali evaporitici. L'argilla che separa gli strati gessosi è stata invece deposta nelle fasi climatiche umide, quando piogge intense provocavano il ruscellamento delle aree emerse e il trasporto delle particelle più fini nel bacino. Durante le fasi umide i gessi non potevano formarsi perché l'evaporazione non era sufficientemente intensa. Si tratta di uno dei casi più spettacolari e meglio studiati al mondo di sedimentazione influenzata dalle variazioni climatiche naturali provocate da cause astronomiche (KRIJGSMAN *et alii* 1999; LUGLI *et alii* 2010). Le perturbazioni dei parametri orbitali del nostro pianeta provocate dall'interferenza degli altri corpi celesti, cambiano nel tempo l'intensità dell'energia solare (insolazione) che raggiunge la superficie del nostro pianeta. Gli studi eseguiti a partire dagli anni '90 del secolo scorso hanno permesso di evidenziare che, tra i cicli climatici, sono i cosiddetti cicli di Milankovitch, generati dalle perturbazioni dell'eccentricità dell'orbita (che si ripete ogni 400.000 e 100.000 anni), dell'inclinazione dell'asse terrestre (41.000 anni) e della precessione degli equinozi (circa 21.000 anni), ad aver regolato la deposizione dei gessi e delle argille. Nel Mediterraneo infatti l'alternanza di fasi climatiche arido/umido sono direttamente correlate alla variazione dell'insolazione solare governate dalla precessione degli equinozi (HILGEN *et alii* 2006). Ciascuna coppia di strati costituita da gesso e argilla che vediamo nella scarpata della Vena del Gesso registra quindi la deposizione avvenuta nell'arco di circa 21.000 anni (fig. 3, LUGLI *et alii* 2010). I 16 strati della Vena del Gesso, che raggiunge uno spessore di oltre 200 m, sono stati depositi in circa 340.000 anni. Lo studio degli isotopi dello stronzio ha inoltre messo in evidenza che ciascuno dei cicli processionali registra variazioni idrologiche del bacino legate a contributi significativi di acque continentali che aumentano progressivamente verso l'alto della sequenza della Vena, suggerendo una progressiva riduzione degli scambi del Mediterraneo con l'Oceano Atlantico (REGHIZZI *et alii* 2018).

La scarpata dei gessi

Ma a cosa dobbiamo l'assetto della Vena del Gesso? E in particolare come si è originata la spettacolare scar-

pata che si è formata lungo la formazione gessosa? Gli strati hanno qui l'assetto di una monoclinale, sono cioè inclinati verso la pianura con un angolo pressoché costante, il cui lato meridionale, verso monte, è stato completamente asportato dall'erosione (figg. 1-2). La scarpata si è formata a causa della maggiore resistenza ai fenomeni erosivi degli strati gessosi rispetto ai sedimenti argillosi che si trovano immediatamente alla base (argille eusiniche) e al tetto (Argille Azzurre). Le argille vengono erose più velocemente e tendono a formare morfologie calanchive spesso solcate da frane per colata. Così la testata degli strati gessosi, sebbene il gesso sia un minerale solubile, arretra più lentamente rispetto alle zone dove affiorano le argille. È quindi a causa dell'erosione selettiva che gli strati gessosi staccano in modo spettacolare sul paesaggio, formando la caratteristica scarpata. Dal punto di vista geologico la monoclinale inclinata della Vena del Gesso potrebbe anche essere definita una *cuesta*, una dorsale asimmetrica, con debole pendenza degli strati con un profilo debolmente inclinato da una parte (verso la pianura) e uno molto ripido dall'altra (verso monte). Il lato sud è caratterizzato dall'affioramento delle testate degli strati gessosi messi in evidenza dall'erosione, mentre nel lato sud il pendio è più dolce e segue l'orientamento del tetto degli strati.

Le faglie, il graben e i gessi che si accavallano

Una caratteristica poco conosciuta della geologia della Vena del Gesso è la coesistenza nello spazio di pochi chilometri di strutture distensive (*graben*), compressive (sovrascorrimenti) e rotazionali (enormi blocchi ruotati). Da Tossignano sono tutte ben visibili nel profilo della Vena (figg. 1-2). Prese singolarmente queste strutture sembrano offrire la chiave per interpretare l'evoluzione tettonica dell'area (MARABINI, VAI 1985; MONTANARI *et alii* 2007), ma prese nel loro insieme vanno a fornire un quadro ben diverso. Un primo fattore decisivo che permette di interpretarle correttamente è la considerazione che soltanto i gessi presentano queste caratteristiche tettoniche contrastanti, che non sono invece presenti nelle formazioni geologiche sottostanti e sovrastanti.

La coesistenza di queste strutture nei gessi e la loro assenza nelle altre formazioni geologiche sono un chiaro indizio che non possono essere i fenomeni tettonici i responsabili della complessa situazione strutturale della Vena del Gesso (ROVERI *et alii* 2003). Altro fattore decisivo è il riconoscimento che le caratteristiche strutturali contrastanti non sono presenti solo qui, ma hanno marcato l'evoluzione dei gessi dell'intero bacino del Mediterraneo da Israele (LUGLI *et alii* 2013)



Fig. 4 – Veduta aerea che permette di apprezzare per la prima volta la complessità della struttura di Monte Penzola. In passato interpretata come sovrascorrimento tettonico, essa appare invece compatibile con fenomeni di scivolamento per gravità di grandi blocchi gessosi sull'antico fondo del mare durante il Messiniano (foto P. Lucci).

alla Sicilia, fino alla Spagna, Marocco e Cipro (MANZI *et alii* 2021).

La Vena è in realtà costituita da enormi blocchi giustapposti, ben evidenti a Monte Penzola e Monte Mauro (ROVERI *et alii* 2003, REGHIZZI *et alii* 2019). Le faglie indicate nella figura non sono quindi faglie in senso stretto ma rappresentano le superfici di contatto di singoli blocchi scivolati lungo il pendio subito dopo la deposizione degli strati gessosi. I grandi blocchi si sono accatastati l'uno di fianco all'altro e almeno in un caso l'uno sopra all'altro a Monte Penzola, simulando un sovrascorrimento tettonico (fig. 4). Le strutture che vediamo non sono quindi il frutto di dislocazione per motivi tettonici (faglie), ma hanno origine gravitativa, sono cioè il frutto di frane sottomarine innescate dal sollevamento dell'anticlinale di Riolo (ROVERI *et alii* 2003).



Fig. 5 – Cristalli di selenite parzialmente trasformati in anidrite durante il seppellimento e successivamente reidratata in gesso microcristallino di colore bianco dalle acque meteoriche. Località di Orzara, ad ovest di Monte Penzola (foto S. Lugli).

Le trasformazioni gesso-anidrite-gesso

I gessi della Vena a ovest di Tossignano portano i segni di un ulteriore complesso fenomeno, chiamato il ciclo dei solfati. A causa di variazioni della temperatura i cristalli primari di gesso, per esempio la selenite, possono trasformarsi in anidrite e poi di nuovo in gesso, formando l'alabastro gessoso. Questa roccia microcristallina dal caratteristico colore biancastro è tipica della zona di Volterra dove viene lavorata a partire dall'epoca etrusca (si veda LUGLI 2019b per l'uso del gesso alabastrino nella storia dell'arte). La prima fase della trasformazione (gesso-anidrite) si verifica durante il seppellimento ed è provocata dall'aumento geotermico della temperatura che si verifica scendendo in profondità nella crosta terrestre. Già a 600 m di profondità in condizioni di gradiente geotermico normale la temperatura raggiunge 52 °C e il gesso non è più stabile e si trasforma in anidrite con liberazione dell'acqua di cristallizzazione (MURRAY 1964). Questo fenomeno fa sì che a profondità superiori a 1000 m praticamente non esistano rocce gessose, ma solo rocce anidritiche (SHEARMAN 1983).

Nel nostro caso, successivamente al seppellimento,

le fasi dell'orogenesi appenninica hanno determinato l'esumazione delle rocce evaporitiche che si trovano oggi in affioramento. In tali condizioni, caratterizzate da temperature sempre inferiori a 52 °C, l'anidrite non è più stabile e si idrata a formare gesso grazie all'infiltrazione delle acque di pioggia e al contatto con le acque di falda.

La fase di gessificazione produce cristalli di gesso microscopici e il prodotto finale della idratazione è una roccia alabastrina che conserva le strutture della roccia selenitica originaria. Sono quindi ancora visibili i bordi degli originari cristalli a coda di rondine (pseudomorfi) che però sono stati trasformati in una massa di gesso microcristallino di colore bianco.

Nella Vena del Gesso l'affioramento di Orzara, ad ovest di Monte Penzola, presenta caratteristiche straordinarie, perché la trasformazione gesso-anidrite si è verificata solo in parte sui bordi di cristalli di selenite che oggi appaiono orlati da una sottile fascia di gesso alabastrino bianco (fig. 5). In questo caso il seppellimento non è durato il tempo sufficiente per consentire la trasformazione totale della roccia, perché già a partire da 4 milioni di anni fa l'intera Vena del Gesso ha subito il sollevamento che l'ha portata all'assetto

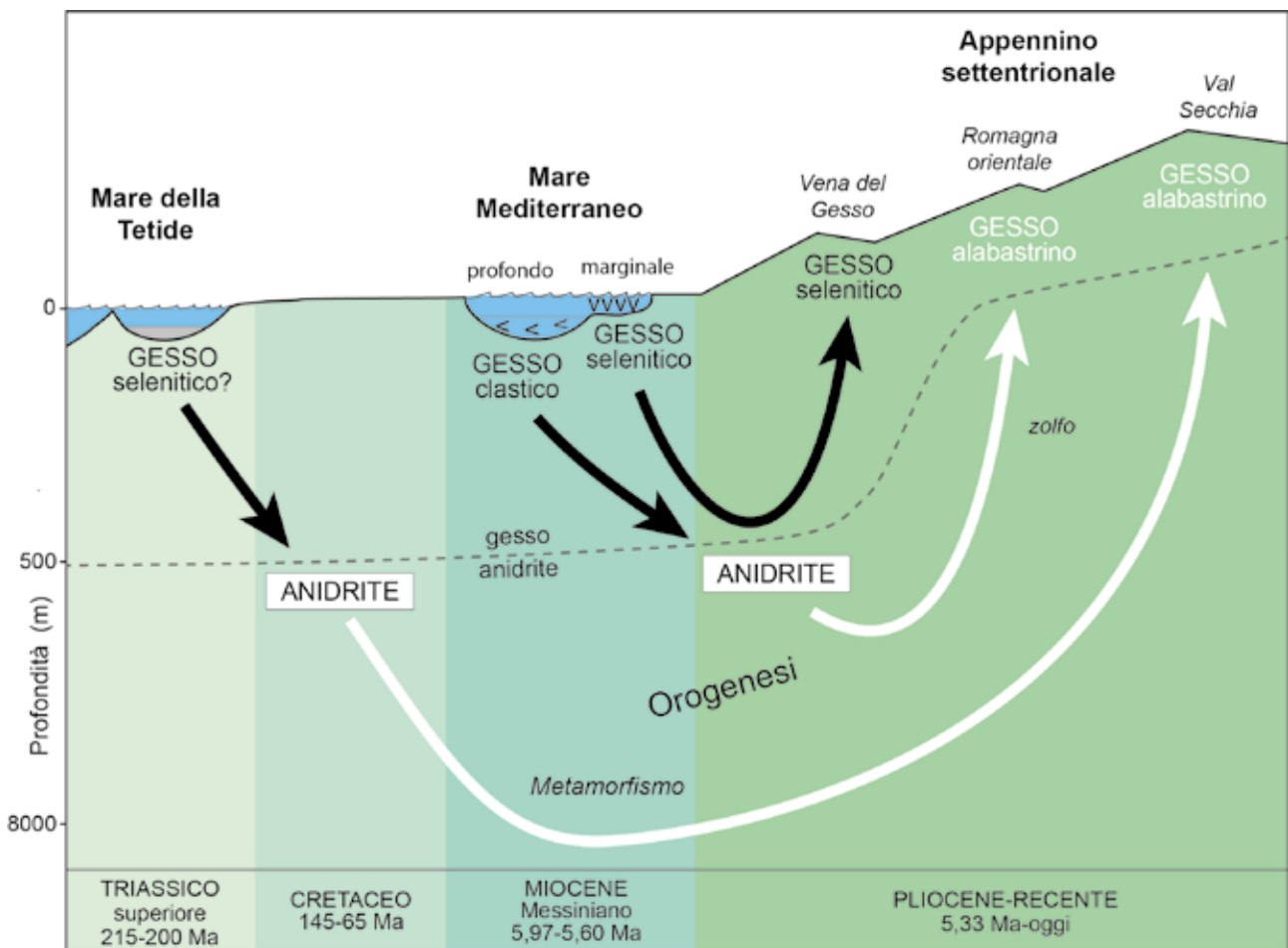


Fig. 6 – La storia geologica di seppellimento ed esumazione dei gessi messiniani a confronto con quella dei gessi triassici.

attuale.

Il fatto che nella Vena del Gesso la trasformazione si sia verificata soltanto nell'estremità occidentale degli affioramenti è legato al seppellimento dovuto alla deposizione delle Argille Azzurre, che non superò 600 m, ma si è sommato il seppellimento della coltre Ligure che fu messa in posto tra 4,5 e 0,781 milioni di anni fa (si veda ROSSI *et alii* 2021 per una sintesi dell'evoluzione tettonico-sedimentaria della zona). Per questo motivo solo qui la profondità di seppellimento totale raggiunta dei gessi nella zona di Sassatello, all'estremità occidentale della Vena del Gesso, è di 1100 m, ben superiore a quella di circa 600 m necessaria per innescare la reazione mineralogica (ROSSI *et alii* 2021). Considerando le modalità geologiche con le quali si è verificato il seppellimento, la transizione gesso-anidrite potrebbe essere avvenuta circa 4 milioni di anni fa, nel Pliocene.

Questi fenomeni, insieme alla maturazione della materia organica e alla migrazione di idrocarburi, favoriscono la formazione dello zolfo nella zona di Sassatello e in particolare nella Romagna orientale (LUGLI *et alii* 2016 e ROSSI *et alii* 2021).

Evoluzione simile, anche se molto più intensa e tormentata, hanno avuto i Gessi triassici della Formazione di Burano nel Parco nazionale dell'Appennino Tosco-emiliano (LUGLI 2001 e 2009). Nella fig. 6 viene messa a confronto l'evoluzione geologica dei Gessi Triassici della Val Secchia e quella dei gessi messiniani della Vena e della Romagna orientale.

Bibliografia

- AA.VV. 2022, *Proposal of the evaporitic karst and caves of the Northern Apennines for inscription on the UNESCO world heritage list. Nomination dossier*, (Regione Emilia-Romagna e Ministero della transizione ecologica), s.l. (<http://www.venadelgesso.it/wh/nominationdossier2.pdf>).
- M.A. BASSETTI, V. MANZI, S. LUGLI, M. ROVERI, A. LONGINELLI, F. RICCI LUCCHI, M. BARBIERI 2004, *Paleoenvironmental significance of Messinian post-evaporitic lacustrine carbonates in the Northern Apennines, Italy*, "Sedimentary Geology" 172, pp. 1-18.
- D. BIGI, S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI 2022, *Are fluid inclusions in gypsum reliable paleoenvironmental indicators? An assessment of the evidence from the Messinian evaporates*, "Geology", pp. 1-6.
- CIESM 2008, *The Messinian salinity crisis from mega-deposits to microbiology*, in F. BRIAND (Ed.), *A consensus report*, in 33^{ème} CIESM Workshop Monographs, 33, CIESM, 16, bd de Suisse, MC-98000, Monaco, pp. 1-168.
- A.M. CODY, R.D. CODY 1988, *Gypsum nucleation and crystal morphology in analogy saline terrestrial environments*, "Journal of Sedimentary Petrology" 58, 2, pp. 247-255.
- F. DELA PIERRE, M. NATALICCHIO, S. FERRANDO, R. GIUSTETTO, D. BIRGEL, G. CARNEVALE, S. GIER, F. LOZAR, D. MARABELLO, J. PECKMANN 2015, *Are the large filamentous microfossils preserved in Messinian gypsum colorless sulfide-oxidizing bacteria?*, "Geology" 43, 10, pp. 855-858.
- R. GENNARI, S.M. IACCARINO, A. DI STEFANO, G. STURIALE, P. CIPOLLARI, V. MANZI, M. ROVERI, D. COSENTINO 2008, *The Messinian-Zanclean boundary in the Northern Apennine*, "Stratigraphy" 5, pp. 307-322.
- Z. GVIRTZMAN, V. MANZI, R. CALVO, I. GAVRIELI, R. GENNARI, S. LUGLI, M. REGHIZZI, M. ROVERI 2017, *Intra-Messinian truncation surface in the Levant Basin explained by subaqueous dissolution*, "Geology" 45, pp. 915-918.
- F. HILGEN, H. BRINKHUIS, W.-J. ZACHARIASSE 2006, *Unit stratotypes for global stages: The Neogene perspective*, "Earth-Science Reviews" 74, pp. 113-125.
- L.A. HARDIE, H.P. EUGSTER 1971, *The depositional environment of marine evaporites, a case for shallow, clastic accumulation*, "Sedimentology" 16, pp. 187-220.
- K. HSÜ, W.B.F. RYAN, M. CITA 1973, *Late Miocene desiccation of the Mediterranean*, "Nature" 242, pp. 240-244.
- W. KRIJGSMAN, F.J. HILGEN, I. RAFFI, F.J. SIERRO, D.S. WILSON 1999, *Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis*, "Nature" 400, pp. 652-655.
- S. LUGLI 1999, *Geology of the Realmonte salt deposit, a desiccated Messinian Basin (Agrigento, Sicily)*, "Memorie della Società Geologica Italiana" 54, pp. 75-81.
- S. LUGLI 2001, *Timing of post-depositional events in the Burano Formation of the Secchia Valley (Upper Triassic, northern Apennines), clues from gypsum-anhydrite transitions and carbonate metasomatism*, "Sedimentary Geology" 140, pp. 107-122.
- S. LUGLI 2009, *La storia geologica dei gessi triassici della Val Secchia*, in M. CHIESI, P. FORTI (a cura di), *Il progetto Trias*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. XXII), Bologna, pp. 25-36.

- S. LUGLI 2019a, *I grandi cristalli di gesso di Monte Mauro, quasi un primato mondiale*, in M. COSTA, P. LUCCI, S. PIASTRA (a cura di), *I Gessi di Monte Mauro, studio multidisciplinare di un'area carsica nella Vena del Gesso romagnola*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. XXXIV), Bologna, pp. 45-48.
- S. LUGLI 2019b, *Il gesso in natura e nell'arte*, in D. GULLÌ, S. LUGLI, R. RUGGIERI, R. FERLISI (a cura di), *GeoArcheoGypsum2019, Geologia e archeologia del gesso: dal lapis specularis alla scagliola*, Palermo, pp. 17-31.
- S. LUGLI, B.C. SCHREIBER, B. TRIBERTI 1999, *Giant polygons in the Realmonte mine (Agrigento, Sicily): evidence for the desiccation of a Messinian halite basin*, "Journal of Sedimentary Research" 69, pp. 764-771.
- S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER 2010, *The Primary Lower Gypsum in the Mediterranean: A new facies interpretation for the first stage of the Messinian salinity crisis*, "Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology" 297, pp. 83-99.
- S. LUGLI, R. GENNARI, Z. GVIRTZMAN, V. MANZI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER 2013, *Evidence of clastic evaporites in the canyons of the Levant basin (Israel): implications for the Messinian salinity crisis*, "Journal of Sedimentary Research" 83, pp. 942-954.
- S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER 2015, *The deep record of the Messinian salinity crisis: evidence of a non-desiccated Mediterranean Sea*, "Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology" 433, pp. 201-218.
- S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI 2016, *Geologia dei gessi e solfi della Romagna Orientale*, in M.L. GARBARI, P. LUCCI, S. PIASTRA (a cura di), *Gessi e solfi della Romagna Orientale*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia s. II, vol. XXXI), Bologna, pp. 15-26.
- V. MANZI, R. GENNARI, S. LUGLI, M. ROVERI, N. SCAFETTA, B.C. SCHREIBER 2012, *High-frequency cyclicity in the Mediterranean Messinian evaporites: evidence for solar-lunar climate forcing*, "Journal of Sedimentary Research" 82, pp. 991-1005.
- V. MANZI, S. LUGLI, F. RICCI LUCCHI, M. ROVERI 2005, *Deep-water clastic evaporites deposition in the Messinian Adriatic foredeep (Northern Apennines, Italy): did the Mediterranean ever dry out?*, "Sedimentology" 52, pp. 875-902.
- V. MANZI, M. ROVERI, R. GENNARI, A. BERTINI, U. BIFFI, S. GIUNTA, S.M. IACCARINO, L. LANCI, S. LUGLI, A. NEGRI, A. RIVA, M.E. ROSSI, M. TAVIANI 2007, *The deep-water counterpart of the Messinian Lower Evaporites in the Apennine foredeep: the Fanantello section (Northern Apennines, Italy)*, "Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology" 251, pp. 470-499.
- V. MANZI, S. LUGLI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER 2009, *A new facies model for the Upper Gypsum (Sicily, Italy): chronological and palaeoenvironmental constraints for the Messinian salinity crisis in the Mediterranean*, "Sedimentology" 56, pp. 1937-1960.
- V. MANZI, R. GENNARI, S. LUGLI, D. PERSICO, M. REGHIZZI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER, R. CALVO, I. GAVRIELI, Z. GVIRTZMAN 2018, *The onset of the Messinian salinity crisis in the deep Eastern Mediterranean basin*, "Terra Nova" 2018:00, pp. 1-10.
- V. MANZI, A. ARGNANI, A. CORCAGNANI, S. LUGLI, M. ROVERI 2020, *The Messinian salinity crisis in the Adriatic foredeep: evolution of the largest evaporitic marginal basin in the Mediterranean*. "Marine and Petroleum Geology" 115, pp. 1-19.
- V. MANZI, R. GENNARI, S. LUGLI, D. PERSICO, M. ROVERI, I. GAVRIELI, Z. GVIRTZMAN 2021, *Synchronous onset of the Messinian salinity crisis and diachronous evaporite deposition: New evidences from the deep Eastern Mediterranean basin*, "Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology" 584, pp. 1-8.
- S. MARABINI, G.B. VAI 1985, *Analisi di facies e macro-tettonica della Vena del Gesso in Romagna*, "Bollettino della Società Geologica Italiana" 104, pp. 21-42.
- S. MARABINI, G.B. VAI 1989, *Geology of the Monticino Quarry, Brisighella, Italy. Stratigraphic implications of its late Messinian mammal fauna*, "Bollettino della Società Paleontologica Italiana" 28, 2-3, pp. 369-382.
- A. MICALLEF, A. CAMERLENGHI, D. GARCIA-CASTELLANOS, D. CUNARRO OTERO, M. GUTSCHER, G. BARRECA, D. SPATOLA, L. FACCHIN, R. GELETTI, S. KRASTEL, F. GROSS, M. URLAUB 2018, *Evidence of the Zanclean megaflood in the eastern Mediterranean basin*, "Scientific Reports" 8, p. 1078.
- D. MONTANARI, C. DEL VENTISETTE, M. BONINI, F. SANI 2007, *Passive-roof thrusting in the Messinian Vena del Gesso Basin (Northern Apennines, Italy): constraints from field data and analogue models*, "Geological Journal" 42, 5, pp. 455-476.
- R.C. MURRAY 1964, *Origin and diagenesis of gypsum and anhydrite*, "Journal of Sedimentary Petrology"

- 34, pp. 512-523.
- L. OGNIBEN 1957, *Petrografia della serie Solfifera Siciliana e considerazioni geologiche relative*, "Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia" 33.
- G. PANIERI, S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI, B.C. SCHREIBER, K.A. PALINSKA 2010, *Ribosomal RNA gene fragments from fossilized cyanobacteria identified in primary gypsum from the late Miocene, Italy*, "Geobiology" 8, pp. 101-111.
- G.C. PAREA, F. RICCI LUCCHI 1972, *Resedimented evaporites in the periadriatic trough (Upper Miocene, Italy)*, "Israel Journal of Earth Science", 21, pp. 125-141.
- M. REGHIZZI, S. LUGLI, V. MANZI, F.P. ROSSI, M. ROVERI 2018, *Orbitally forced hydrological balance during the messinian salinity crisis: insights from strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Vena del Gesso Basin (Northern Apennines, Italy)*, "Paleoceanography and Paleoclimatology" 33, pp. 716-731.
- M. REGHIZZI, S. LUGLI, V. MANZI, M. ROVERI 2019, *Aspetti geologici dei Gessi di Monte Mauro*, in M. COSTA, P. LUCCI, S. PIASTRA (a cura di), *I Gessi di Monte Mauro, studio multidisciplinare di un'area carsica nella Vena del Gesso romagnola*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. XXXIV), Bologna, pp. 17-34.
- F. RICCI LUCCHI 1986, *The Oligocene to recent foreland basins of the Northern Apennines*. "International Association of Sedimentologists. Special Publication" 8, pp. 105-139.
- F. P. ROSSI, A. SCHITO, V. MANZI, M. ROVERI, S. CORRADO, S. LUGLI, M. REGHIZZI 2021, *Paleo-thermal constraints on the origin of native diagenetic sulfur in the Messinian evaporites: The Northern Apennines foreland basin case study (Italy)*, "Basin Research" 2021.00, pp. 1-17.
- M. ROVERI, V. MANZI 2006, *The Messinian salinity crisis: looking for a new paradigm?*, "Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology" 238, pp. 386-398.
- M. ROVERI, V. MANZI, F. RICCI LUCCHI, S. ROGLEDI 2003, *Sedimentary and tectonic evolution of the Vena del Gesso basin (Northern Apennines, Italy): Implications for the onset of the Messinian salinity crisis*, "Geological Society of America Bulletin" 115, 4, pp. 387-405.
- M. ROVERI, S. LUGLI, V. MANZI, R. GENNARI, S.M. IACCARINO, F. GROSSI, M. TAVIANI 2006, *The record of Messinian events in the Northern Apennines foredeep basins. RCMNS IC Parma 2006* "The Messinian salinity crisis revisited II", Pre-Congress Field Trip Guidebook, Acta Naturalia de "L'Ateneo Parmense" 42, 1.
- M. ROVERI, S. LUGLI, V. MANZI, R. GENNARI 2008, *Large-scale mass wasting processes in the Messinian Ciminna Basin (northern Sicily)*, "Geoacta" 7, pp. 45-62.
- M. ROVERI, R. FLECKER, W. KRIJGSMAN, J. LOFI, S. LUGLI, V. MANZI, F.J. SIERRO, A. BERTINI, A. CAMERLENGHI, G. DE LANGE, R. GOVERS, F.J. HILGEN, C. HÜBSCHER, P.TH. MEIJER, M. STOICA 2014a, *The Messinian Salinity Crisis: past and future of a great challenge for marine sciences*, "Marine Geology" 349, pp. 113-125.
- M. ROVERI, S. LUGLI, V. MANZI, R. GENNARI, B.C. SCHREIBER 2014b, *High-resolution strontium isotope stratigraphy of the Messinian deep Mediterranean basins: implications for marginal to central basins correlation*, "Marine Geology" 349, pp. 113-125.
- M. ROVERI, V. MANZI, A. BERGAMASCO, F.M. FALCIERI, R. GENNARI, S. LUGLI, B.C. SCHREIBER 2014c, *Dense shelf water cascading and Messinian canyons: a new scenario for the Mediterranean salinity crisis*, "American Journal of Science" 314, pp. 751-784.
- W.B.F. RYAN 2009, *Decoding the Mediterranean salinity crisis*, "Sedimentology" 56, pp. 95-136.
- B.C. SCHREIBER 1973, *Survey of the physical features of the Messinian chemical sediments*, in C.W. DROOGER (Ed.), *Messinian Events in the Mediterranean*, Amsterdam, pp. 101-110.
- D.J. SHEARMAN 1985, *Syn depositional and late diagenetic alteration of primary gypsum to anhydrite*, in B.C. SCHREIBER (Ed.), *Sixth International Symposium on Salt*, 1, Salt Institute, pp. 41-55.
- G.B. VAI, F. RICCI LUCCHI 1977, *Algal crusts, autochthonous and clastic gypsum in a cannibalistic evaporite basin; a case history from the Messinian of Northern Apennine*, "Sedimentology" 24, pp. 211-244.

Ringraziamenti: il lavoro qui presentato riassume il frutto di tanti anni di studio della Crisi di Salinità in tutto il bacino del Mediterraneo. Le ultime analisi e le recenti campagne di rilevamento nella Vena del Gesso non sarebbero state possibili senza l'appoggio e il supporto della Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna (FSRER) e del Parco regionale della Vena del Gesso Romagnola, cui va il nostro sentito ringraziamento.