

## I TRAVERTINI DELLA VALLE DI SUSÀ E DELLA VAL CHISONE (PROVINCIA DI TORINO): CARATTERIZZAZIONE SEDIMENTOLOGICA, MORFOLOGICA E IPOTESI GENETICHE

G. Fioraso

CNR - Centro di Studi sulla Geodinamica delle Catene Collisionali, Via Accademia delle Scienze, 5, 10123 Torino

**RIASSUNTO** - *I travertini della Valle di Susa e della Val Chisone (Provincia di Torino): caratterizzazione sedimentologica, morfologica e ipotesi genetiche.* Il rilevamento del Foglio 132-152-153, "Bardonecchia", della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 ha consentito di individuare, nelle valli Susa e Chisone, numerosi lembi di travertino e di depositi concrezionari. Il loro studio ha permesso di delineare la distribuzione dei processi di precipitazione carbonatica in relazione alla tipologia del substrato roccioso pre-Quaternario e alle altre formazioni superficiali. L'analisi dei caratteri sedimentologici e tessiturali ha condotto al riconoscimento di cinque tipologie di facies: brecce a cemento travertinoso, travertini fitoermali, stromatolitici, clastici e speleotemi. Per ognuna di esse è fornita una descrizione micro- e macromorfologica e tessiturale. L'insieme delle caratteristiche individuate, le associazioni di facies riscontrate e l'osservazione dei processi di incrostazione tuttora in corso in numerose località della Valle di Susa, hanno consentito di ricostruire gli ambienti deposizionali nei quali si sono sviluppati i corpi travertinosi.

Il quadro così delineato ha permesso di evidenziare lo stretto legame tra i processi di precipitazione del carbonato in ambiente subaereo e la distribuzione dei principali fenomeni di collasso gravitativo (deformazioni profonde di versante e grandi accumuli di frana) che coinvolgono estensivamente i rilievi modellati nelle successioni metasedimentarie a prevalenti calcescisti. Condizioni di accentuata fratturazione e disarticolazione del substrato sono in grado di accelerare il rilascio di  $\text{CaCO}_3$  alle acque meteoriche che permeano l'ammasso roccioso. La riequilibrio dei parametri chimico-fisici determinano invece la riprecipitazione del carbonato nei punti di emergenza in superficie dei fluidi. Viene inoltre ipotizzata un'influenza delle strutture meccaniche fragili, quali sovrascorrimenti e faglie ad alto angolo, nel facilitare la veicolazione delle acque e nel condizionare la distribuzione dei prodotti di dissoluzione e riprecipitazione del carbonato di calcio.

Sulla base dei rapporti intrattenuti con gli altri depositi, la formazione del travertino sembra essersi instaurata al termine del Pleistocene superiore, successivamente al ritiro delle principali masse glaciali che occupavano i maggiori fondovalli.

**ABSTRACT** - *The travertine of Susa and Chisone Valleys (Torino Province): sedimentological and morphological characterization and genetic hypothesis.* The survey of Sheet 132-152-153 "Bardonecchia" of the Geological Map of Italy scale 1:50,000 determined in the Susa and Chisone Valleys numerous travertine deposits and concretionary deposits. Their study consented an outline of distribution of carbonatic precipitation process in relation to the typology of the pre-Quaternary substratum and the superficial formations. The observation of sedimentological and textural characteristics led to the recognition of five facies typologies: breccias with travertine cement; phytohermal, stromatolitic and clastic travertines; speleothems. For every one of these typologies, a micro- and macromorphologic and textural characterisation is supplied. The overall characteristics identified, the association of facies checked and the observation of the precipitation processes still active in numerous places in Susa Valley made it possible to determine the depositional environment where bodies had developed.

The picture thus defined allowed us to point out the close relationship between the precipitation of carbonate in a subaerial environment and the distribution of the main phenomena of gravitational collapse (deep-seated gravitational slope deformations and large landslide deposits) which involve extensively relieves modelled on the metasedimentary successions with main calcschists.

Conditions of accentuated fracturing and disjuncting of the substrate allow for the release of calcium carbonate to the meteoric waters which permeate the rocky structure. A balance of the chemical-physical parameters determine reprecipitation of carbonates at the emergency points at the surface of the fluid. Another influence hypothesised on the brittle structures are thrusts and faults, facilitating the transport of the water and conditioning the distribution of products of dissolution and reprecipitation of the calcium carbonate.

Considering the relationship with other sediments, the deposition of travertine seems to have been established at the end of the Upper Pleistocene with the withdrawal of glacial masses which occupied the main valleys.

**Parole chiave:** Travertini, Sedimentologia, Geomorfologia, Deformazioni gravitative profonde di versante, Valle di Susa, Val Chisone, Alpi Occidentali

**Key words:** Travertines, Sedimentology, Geomorphology, Deep-seated gravitational slope deformations, Susa Valley, Chisone Valley, Western Alps

### 1. INTRODUZIONE

Le alte valli di Susa e del Chisone sono caratterizzate da una complessa coltre di formazioni superficiali, costituita da depositi di diversa natura ed età, testimoni dell'articolata sequenza di episodi erosivo-deposizionali, da sin- a postglaciali, che hanno agito in questo settore

delle Alpi Cozie. Il rilevamento del Foglio "Bardonecchia" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 1999) ha consentito di chiarire i rapporti reciproci tra le singole unità e di definirne la posizione nel tempo e nello spazio (Dela Pierre *et al.*, 1999). Fra questi sono risultati particolarmente interessanti i numerosi quanto circoscritti corpi travertinosi di

istribuiti sui versanti vallivi. La loro particolarità risiede nell'estrema varietà di facies e nell'ubiquitarità degli affioramenti. Inoltre la quasi assoluta assenza di analoghi depositi concrezionari nell'arco alpino occidentale contrasta con quanto avviene invece in altre regioni italiane e in particolare nell'area appenninica (Ford & Pedley, 1996, *cum bibl.*).

La presenza di travertino in Valle di Susa venne per la prima volta segnalata nel Foglio 54, "Oulx", della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 (Servizio Geologico d'Italia, 1911) e successivamente ripresa da Capello (1942) nell'ambito di uno studio a carattere morfologico effettuato nell'area che si estende a monte dell'abitato di Oulx. Più recentemente una serie di indagini finalizzate alla ricostruzione dell'evoluzione quaternaria della Valle di Susa, condotte come tesi di laurea (Fioraso, 1994; Paro, 1997; Josa, 1999), hanno consentito di descrivere con maggiore dettaglio una serie di corpi travertinosi localizzati sul versante destro della Dora Riparia, nei settori di Chiomonte, Salbertrand e Oulx. Un quadro più completo sulla distribuzione dei travertini è stato fornito da Giardino & Fioraso (1998) e dal citato Foglio 132-152-153, "Bardonecchia" (Servizio Geologico d'Italia, 1999).

Al di fuori dell'area investigata, depositi concrezionari individuati in diverse località della Valle d'Aosta sono stati segnalati da Squinabol (1888), Elter & Elter (1965) e da Debenedetti & Turi (1975). Oltralpe, Chardon (1993) e Barféty *et al.* (1995) descrivono nel dettaglio i travertini di origine termale di Monétier-les-Bains, località situata nei pressi di Briançon e a pochi chilometri dal confine italo-francese.

La complessità geologica dell'area oggetto del presente studio, nella quale i rapporti tra le singole unità del substrato pre-Quaternario sono spesso mascherati dalla presenza di estesi accumuli gravitativi e da ancor più imponenti fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante, ha fornito lo spunto per un'analisi di dettaglio dei travertini. In questa nota sono presentati i primi risultati di uno studio di carattere morfologico e sedimentologico, con il duplice intento di inquadrare i fenomeni di concrezionamento nell'ambito dell'evoluzione recente e attuale dell'area investigata e di effettuare una prima interpretazione dei meccanismi di dissoluzione e riprecipitazione dei carbonati, responsabili della formazione dei corpi travertinosi.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nell'area del Foglio "Bardonecchia", oggetto della presente indagine, sono comprese la media e l'alta Valle di Susa, nonché settori marginali delle contigue valli Cenischia e Chisone (Fig. 1). Il substrato pre-Quaternario affiorante appartiene, nelle interpretazioni classiche, ai domini piemontese e brianzonese. Seguendo lo schema di Dela Pierre *et al.* (1999), proposto in base ai risultati delle indagini effettuate recentemente nell'area, sono state distinte una serie di unità tettonostratigrafiche (*sensu* Dela Pierre *et al.*, 1997) definite "di margine continentale", "oceaniche" e "ofiolitiche".

Le "unità di margine continentale" comprendono un basamento cristallino pre-Triassico mono- e polimeta-morfico (rappresentato rispettivamente dai complessi d'Ambin e di Clarea) e una successione autoctona di

metasedimenti mesozoici di copertura, costituita da calcescisti, marmi e quarziti. A queste si associa un gruppo di unità mesozoiche di copertura, a prevalenti rocce carbonatiche e a subordinati calcescisti, rappresentate dalle unità tettonostratigrafiche dei Re Magi, dello Chaberton - Grand Hoche - Grand Argentier, di Valfredda, di Gad e del Vallonetto.

Le "unità oceaniche", intese nell'accezione di unità deposte su crosta oceanica, sono rappresentate dalle unità dell'Albergian e del Lago Nero. Al loro interno le successioni sono costituite da prevalenti calcescisti e da subordinati marmi, quarziti e pietre verdi.

Fra le "unità ofiolitiche" sono state distinte quelle della Roche de l'Aigle, del Vin Vert e di Cerogne - Cianpiplagna. Costituite da successioni a prevalenti calcescisti e ofioliti, la loro deposizione su crosta oceanica non è certa.

Le singole unità sono giustapposte o separate da importanti sovrascorrimenti a basso angolo e/o da faglie subverticali. I contatti tettonici sono frequentemente sottolineati da ammassi di gessi o da estese fasce di breccie tettoniche. Un primo sistema di faglie subverticali, con direzione N100°÷N140°, definisce un gruppo di strutture con estensione longitudinale chilometrica particolarmente evidenti lungo la dorsale che unisce il Monte Segurét alla Cima del Vallonetto. La loro presenza trova precisi riscontri e corrispondenze nell'espressione morfologica e nell'orientazione delle direttrici di deflusso secondarie del sistema idrografico (es. versante sinistro del Vallone di Rochemolles).

Un secondo gruppo di strutture, con direzione media N60°, è costituito da faglie e fratture di estensione plurichilometrica, particolarmente ravvicinate e pervasive. Queste mostrano di tagliare, secondo ogni evidenza, tutti gli altri sistemi fragili del substrato (Dela Pierre *et al.*, 1999). In analogia con il precedente, anche questo sistema trova il massimo riscontro morfologico nel reticolato idrografico principale, individuato dalla Dora Riparia e dal T. Chisone, e in una serie di canali rettilinei che incidono il versante destro della Val Clarea.

L'evoluzione recente dell'area si esprime nella diffusa ed estesa presenza di depositi superficiali di varia natura, che segnalano un'articolata successione di episodi di modellamento sin- e postglaciali. Nella Valle di Susa e nella contigua Val Cenischia sono chiaramente conservate le tracce del modellamento glaciale regionale, rappresentate rispettivamente dai depositi riuniti nel Foglio "Bardonecchia" negli Allogruppi di Clot Sesian e di Salbertrand da un lato, nell'Allogruppo del Moncenisio dall'altro (Dela Pierre *et al.*, 1999). Le singole fasi di avanzata e di ritiro del ghiacciaio segusino sono scandite da una successione di depositi conservati in lembi di modesta estensione, distribuiti a quote progressivamente più basse dai termini più antichi ai più recenti. I depositi attribuibili al glacialismo locale sono invece relegati nelle porzioni più elevate dei bacini idrografici affluenti della Dora Riparia e del Chisone. Tracce di un glacialismo successivo alla massima espansione pleistocenico-superiore e alle sue fasi di ritiro sono riconoscibili solo presso le testate dei bacini tributari a quote superiori ai 2.000 m s.l.m. I ghiacciai attuali, di dimensioni estremamente ridotte, risultano confinati nei settori altimetricamente più elevati del Massiccio d'Ambin.

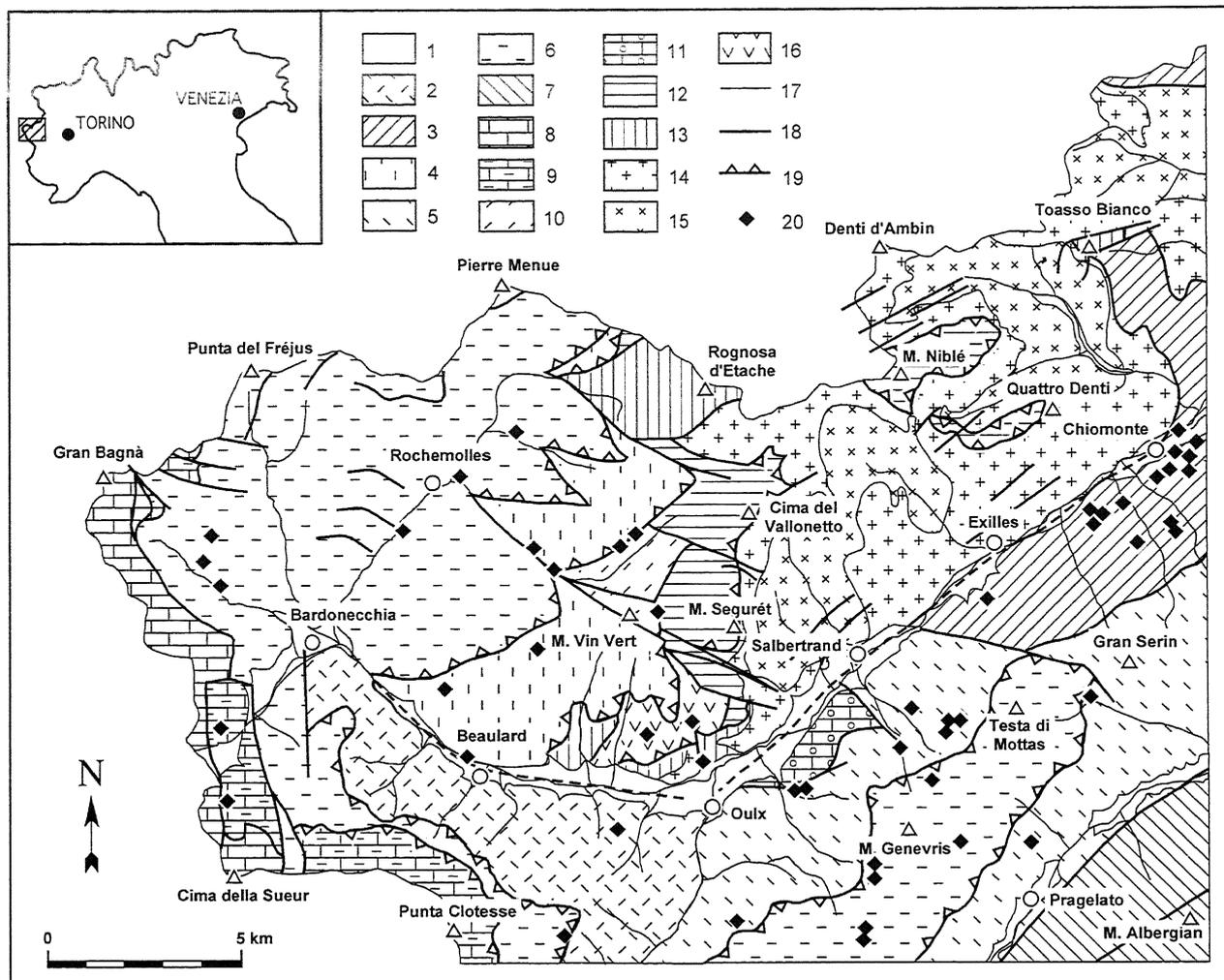


Fig. 1 - Ubicazione e schema geologico-strutturale dell'area di studio (da Servizio Geologico d'Italia, 1999, modificato). 1 = depositi alluvionali; 2 = Complesso di Puys; 3 = Complesso di Venaus; 4 = Unità dell'Aigle; 5 = Unità di Cerogne - Ciantiplagna; 6 = Unità del Lago Nero; 7 = Unità dell'Albergian; 8 = Unità dei Re Magi; 9 = Unità dello Chaberton - Grand Hoche - Grand Argentiere; 10 = Unità di Valfredda; 11 = Unità di Gad; 12 = Unità del Vallonetto; 13 = coperture mesozoiche dell'Ambin; 14 = Complesso d'Ambin; 15 = Complesso di Clarea; 16 = gessi e breccie tettoniche; 17 = contatti stratigrafici; 18 = faglie; 19 = sovrascorrimenti; 20 = travertino.

Location map and geo-structural sketch of the studied area (from Servizio Geologico d'Italia, 1999, modified). 1 = alluvial deposits; 2 = Puys Complex; 3 = Venaus Complex; 4 = Aigle Unit; 5 = Cerogne - Ciantiplagna Unit; 6 = Lago Nero Unit; 7 = Albergian Unit; 8 = Re Magi Unit; 9 = Chaberton - Grand Hoche - Grand Argentiere Unit; 10 = Valfredda Unit; 11 = Gad Unit; 12 = Vallonetto Unit; 13 = Mesozoic cover of Ambin Massif; 14 = Ambin Complex; 15 = Clarea Complex; 16 = gypsum and tectonic breccia; 17 = stratigraphic contacts; 18 = faults; 19 = thrusts; 20 = travertine.

Le forme di accumulo e di esarazione glaciale si presentano il più delle volte rimodellate o dissecate dall'approfondimento erosionale operato dai corsi d'acqua postglaciali, i cui prodotti costituiscono ampie porzioni del fondovalle principale e in misura minore quello di alcuni bacini tributari. Parallelamente all'azione delle acque incanalate hanno operato i processi di rimodellamento legati prevalentemente alla morfogenesi gravitativa (Fig. 2), che ha agito successivamente al ritiro delle masse glaciali. L'area investigata è caratterizzata dalla notevole diffusione degli accumuli gravitativi, alcuni dei quali con estensione superiore al chilometro quadrato e potenza variabile da decine fino, in qualche caso, ad un centinaio di metri. Gli accumuli riconosciuti mostrano in netta prevalenza di essere geneticamente connessi al-

l'evoluzione di più ampi fenomeni di deformazione gravitativa profonda che coinvolgono estesi settori di versante. La localizzazione dei fenomeni gravitativi più imponenti nelle aree di affioramento delle unità "oceaniche" e "ofiolitiche", soprattutto lungo la dorsale spartiacque che separa la Valle di Susa dalla Val Chisone, è manifestamente legata alle pessime caratteristiche geomecchaniche che contraddistinguono nell'insieme le successioni metasedimentarie a prevalenti calcescisti. Lo sviluppo di questi fenomeni è inoltre strettamente vincolato all'assetto strutturale fragile degli ammassi rocciosi, e in particolare ai numerosi sistemi di fratture a carattere regionale, localmente pervasivi, che influenzano nell'insieme i caratteri cinematici ed evolutivi delle deformazioni (Giardino & Polino, 1997).

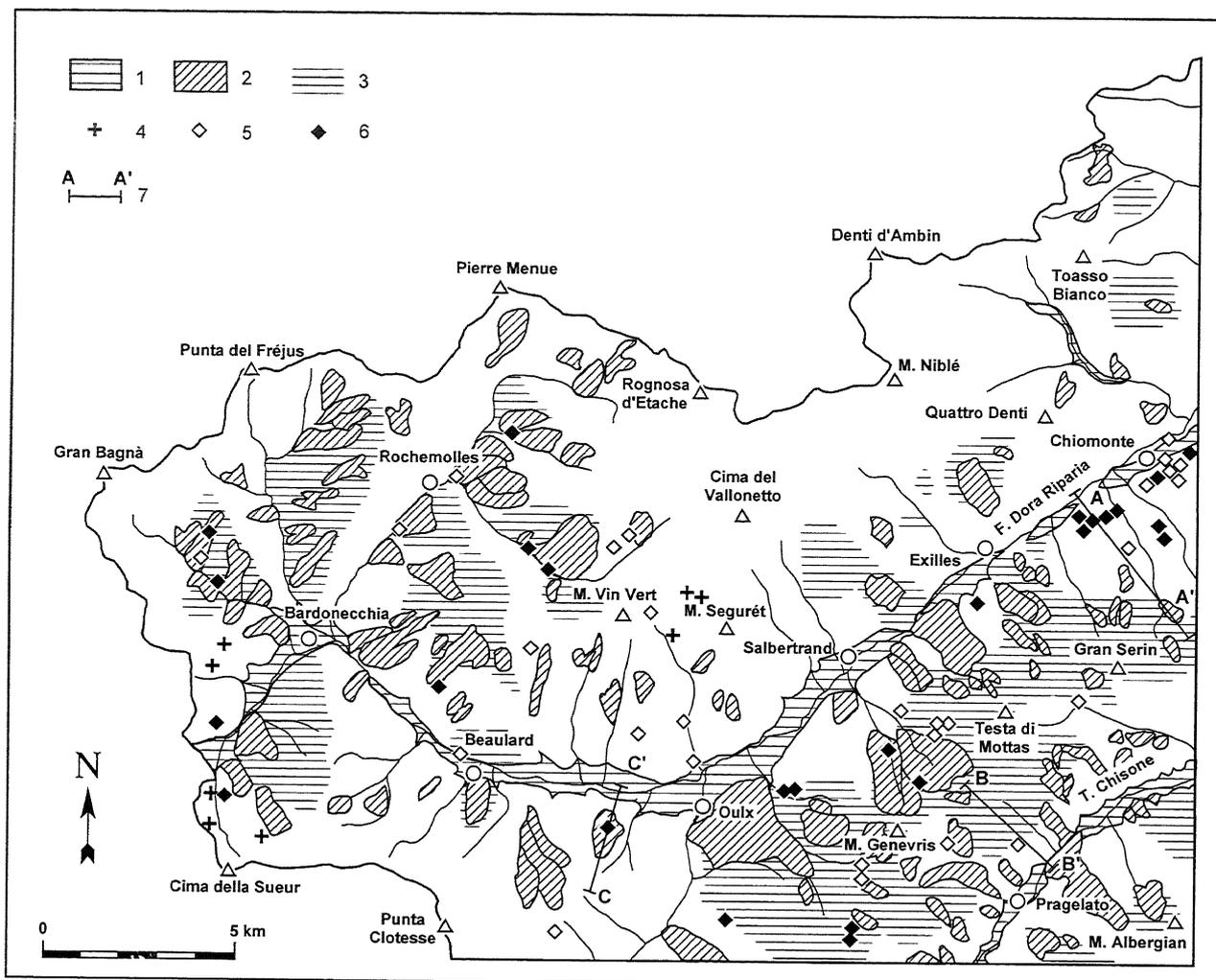


Fig. 2 - Schema di distribuzione dei fenomeni gravitativi nel Foglio "Bardonecchia". 1 = depositi alluvionali; 2 = accumuli gravitativi; 3 = deformazioni gravitative profonde di versante; 4 = breccie a cemento carbonatico; 5 = travertino completamente formato; 6 = travertino in formazione; 7 = traccia di sezione geologica.

*Gravitational phenomena distribution in "Bardonecchia" sheet. 1 = alluvial deposits; 2 = landslide deposits; 3 = deep-seated gravitational slope deformations; 4 = carbonatic cemented breccia; 5 = completely formed travertine; 6 = travertine in formations; 7 = trace of geological cross-section.*

### 3. DISTRIBUZIONE DEI TRAVERTINI

La distribuzione dei corpi travertinosi (cfr. Fig. 2) risulta alquanto irregolare e apparentemente casuale, anche se complessivamente ubiquitaria<sup>1</sup>.

I travertini sono presenti con maggiore frequenza lungo il versante destro della media Valle di Susa, nel tratto compreso tra gli abitati di Oulx e di Chiomonte. Gruppi di affioramenti sono stati individuati anche nel Vallone di Rochemolles e in Valfredda, tributaria di sinistra di quest'ultima. In altre località i prodotti dell'attività di concrezionamento sono invece sporadici e localizzati: fra questi si segnalano i travertini della Valle della Rho e

della Comba della Gorgia (nei pressi dell'abitato di Bardonecchia) e lungo il versante settentrionale della Madonna del Cotolivier, non lontano dall'abitato di Beaulard. Anche in Val Chisone la distribuzione del travertino si mostra chiaramente disomogenea, concentrandosi unicamente sul versante sinistro nei pressi di Prigelato e alla testata del Vallone dell'Assietta. In Val Cenischia non sono invece stati rilevati significativi ammassi di depositi carbonatici.

Altimetricamente i travertini non mostrano una distribuzione preferenziale: le concrezioni presenti alle quote meno elevate sono state individuate a 650 m circa s.l.m., lungo la scarpata che separa il ripiano di Chiomonte dall'alveo della Dora Riparia; il lembo rilevato a quota più elevata è invece ubicato a 2.300 m s.l.m., alla testata del Vallone dell'Assietta e nei pressi della cresta spartiacque che separa le valli di Susa e del Chisone. Nell'insieme si nota tuttavia una tendenza dei processi

<sup>1</sup> In alcune località della Valle di Susa e della Val Chisone numerosi lembi di travertino sono stati sfruttati per ricavarne blocchi lapidei localmente utilizzati nella costruzione di edifici.

di precipitazione del  $\text{CaCO}_3$  a concentrarsi nei settori inferiori dei versanti, a una quota compresa tra gli 800 e i 1.800 m.

Il significato dei processi di concrezionamento può essere meglio chiarito effettuando un confronto tra la distribuzione dei travertini e le caratteristiche litologiche del substrato roccioso (cfr. Fig. 1). Ciò consente di evidenziare una sostanziale sovrapposizione dell'areale di distribuzione dei travertini con quello di affioramento delle unità a prevalenti calcescisti (es.: Unità di Puys - Venaus, Unità di Cerogne - Ciantiplagna e Unità del Lago Nero). Per contro non sono stati individuati corpi travertinosi in corrispondenza dell'affioramento del basamento cristallino del Massiccio d'Ambin e delle unità carbonatiche di copertura.

Particolarmente interessante risulta il raffronto tra la distribuzione dei travertini e la distribuzione dei fenomeni gravitativi (cfr. Fig. 2). Da un lato appare evidente come una parte dei processi di precipitazione carbonatica siano avvenuti o avvengano in tratti di versante estesamente coperti da depositi di frana, ed in particolare come tali manifestazioni si posizionino alla base o in corrispondenza dei corpi di accumulo (es.: settori della Testa di Mottas, del M. Genevris e del Vallone di Roche-molles). Un secondo e più consistente gruppo di masse travertinose si localizza invece nei numerosi ed estesi settori di versante coinvolti da fenomeni di deformazione gravitativa profonda.

L'analisi dei rapporti con le altre unità consente di accertare, almeno in Valle di Susa, come la sedimentazione dei corpi travertinosi attualmente conservati sia avvenuta successivamente alle ultime fasi di modellamento del ghiacciaio segusino. In Val Chisone l'assenza di un glacialismo regionale non permette invece di fornire indicazioni sull'età relativa del lembo travertinoso individuato nei pressi di Prigelato.

In relazione al perdurare dei fenomeni di precipitazione del carbonato di calcio sono stati distinti travertini "in formazione" e "completamente formati". I primi mostrano di essere in rapporto con acque arricchite in  $\text{CaCO}_3$ , localizzandosi in prossimità o a breve distanza da manifestazioni sorgentizie e con una intensità dei processi di concrezionamento che decresce rapidamente all'aumentare della distanza dalla sorgente. I secondi sono invece del tutto svincolati dall'idrografia e dal paesaggio attuale e, il più delle volte, appaiono contraddistinti da marcati fenomeni di rimodellamento erosionale.

#### 4. CARATTERI SEDIMENTOLOGICI E MORFOLOGICI

La presenza di concrezioni carbonatiche originatesi in ambiente subaereo è indubbiamente un fatto insolito nell'arco alpino, in cui il modellamento del paesaggio avviene prevalentemente attraverso l'azione di processi fisico-meccanici legati alla gravità. La particolarità del fenomeno si esprime anche nella molteplicità delle relazioni che intercorrono tra i numerosi parametri chimici, e in secondo luogo biologici, responsabili della precipitazione del carbonato di calcio. A questi si aggiungono una serie di variabili ambientali che controllano, sia pure indirettamente, il processo deposizionale, prime fra tutte la morfologia della superficie su cui avviene il concrezionamento, le modalità di deflusso delle acque e il tipo di vegetazione incrostata. Le infinite combinazioni pos-

sibili tra i due gruppi di variabili trova riscontro nella complessità dei caratteri sedimentologici e microstrutturali che contraddistinguono i travertini della Valle di Susa. Le osservazioni condotte hanno tuttavia permesso di evidenziare una serie di facies corrispondenti, in massima parte, alle tipologie precedentemente delineate nella classificazione di Buccino *et al.* (1978) e successivamente ripresa da D'Argenio *et al.* (1983), D'Argenio & Ferreri (1986) e Carrara (1991). Ideata e utilizzata per la descrizione di travertini formati in contesti geologico-morfologici e ambientali tipici dell'Italia centro-meridionale, questa suddivisione mostra di ben adattarsi anche a un contesto sostanzialmente diverso quale quello studiato. Di seguito vengono passate in rassegna le diverse litofacies riconosciute utilizzando la classificazione citata.

##### *Brecce di versante a cemento travertinoso*

Sono costituite da sedimenti con struttura di tipo *open work* o *partially open work*. I clasti, di dimensioni variabili da centimetriche a decimetriche e localmente superiori al metro, hanno forme differenziate in funzione della natura del deposito a spese del quale avviene la cementazione: forme angolose o subangolose e geometrie prismatiche o tabulari contraddistinguono clasti di origine detritica; un maggiore grado di arrotondamento e di sfericità sono invece indicativi di un trasporto fluviale o glaciale. La matrice, dilavata dalle acque di ruscellamento superficiale, è generalmente scarsa e costituita da ghiaie e ghiaie sabbiose pulite. La petrografia dei clasti è piuttosto monotona: i litotipi prevalenti sono rappresentati da calcescisti, calcescisti marmorei, calcescisti filladici e rare pietre verdi, tutti riferibili alle successioni metasedimentarie ad affinità oceanica e ofiolitica. Una maggiore variazione composizionale, con ciottoli di calcari, dolomie e quarziti, contraddistingue invece le brecce formatesi a spese di originari lembi di depositi glaciali. La distribuzione dei clasti il più delle volte è caotica e solo in pochi casi la presenza di livelli detritici grossolanamente gradati e stratificati indica una maggiore organizzazione interna del sedimento.

Il cemento può costituire delle semplici saldature nei punti di contatto dei clasti, avvolgendoli con veli continui di calcite, oppure può svilupparsi al punto da occludere completamente i vuoti con concrezioni irregolari a struttura concentrica. Nella maggioranza delle brecce osservate sono tuttavia presenti, in misura significativa, cavità primarie sindeposizionali. Lo spessore dei rivestimenti carbonatici è quanto mai variabile verosimilmente in relazione all'entità e al perdurare dei processi di concrezionamento: da pochi decimi di millimetro si possono raggiungere valori di alcuni centimetri.

A scala microscopica il cemento presenta una struttura laminata dovuta alla ripetuta sovrapposizione di successivi livelli di crescita: ciascuno di questi è costituito da un aggregato di cristalli di calcite disposti perpendicolarmente alla superficie di appoggio sul substrato. Il parallelismo dei cristalli è sottolineato da analoghi angoli di estinzione, mentre nei punti di curvatura la calcite mostra una tipica disposizione a ventaglio. Il contatto tra le lamine è generalmente marcato da terminazioni piatte dei cristalli e da repentini cambiamenti nella tessitura, che da macrocristallina diviene microcristallina.

Talvolta le lamine sono attraversate da sottilissimi livelli bruni e opachi ricchi di microinclusioni di natura organica: il loro andamento, variamente ondulato o segmentato, accompagna ed evidenzia le successive fasi di crescita dei singoli individui calcitici. Il nucleo delle cavità risulta spesso riempito da cristalli di calcite spatica con tipica struttura a mosaico.

Nelle brecce il rapporto tra la frazione detritica, il cemento e i vuoti varia considerevolmente da punto a punto anche nell'ambito di uno stesso affioramento, in relazione all'entità e al perdurare dei processi locali di precipitazione carbonatica.

Le facies clastiche non danno mai luogo a forme di accumulo specifiche in quanto localizzate sempre alla base delle sequenze deposizionali travertinose. Talvolta possono anche costituire episodiche e localizzate intercalazioni all'interno delle altre tipologie di depositi.

#### *Travertini fitoermali*

Rappresentano la facies più diffusa. Il loro aspetto può abbracciare un ampio spettro di varietà, da quella di una struttura massiva e compatta da un lato, a quella vacuolare ed estremamente porosa dall'altro: in quest'ultimo caso la roccia è contraddistinta da un aspetto spugnoso e da una notevole leggerezza. L'osservazione dei processi di concrezionamento attualmente in corso consente di verificare come questi avvengano su supporti vegetali in posizione di crescita: fra questi prevalgono muschi e piante igrofile tipiche degli ambienti caratterizzati dalla costante presenza di acque ruscellanti o di percolazione.

I rivestimenti calcitici costituiscono delle guaine di spessore variabile da qualche decimo di millimetro ad alcuni millimetri. Le strutture più comuni sono rappresentate da incrostazioni cilindriche di diametro compreso tra 1 e 10 mm e con lunghezze valutabili in alcuni centimetri. I tubuli possono essere subparalleli con orientazione da verticale a obliqua; in altri e più frequenti casi sono tra loro fittamente intrecciati e collegati da ponti di incrostazione primaria. L'entità e la rapidità dei processi di incrostazione sono tali da consentire di inglobare consistenti porzioni di vegetazione arbustiva e arborea (es. rami, tronchi, radici, ecc.). In tal caso la decomposizione dell'originaria sostanza organica lascia spazio a cavità pseudo-cilindriche, talora di grande diametro (30÷50 cm), sulle cui pareti sono riprodotte, più o meno fedelmente, le strutture e le asperità delle strutture vegetali. Le altre cavità, di forma irregolare e di dimensioni più contenute, sono invece chiaramente sindeposizionali.

Le incrostazioni sono costituite in questa litofacies da un aggregato di calcite microcristallina, particolarmente ricca di inclusioni di sostanza organica che conferiscono un aspetto torbido e opaco alla massa carbonatica. Le irregolari forme e strutture che vi si osservano confermano l'originaria presenza di supporti di natura organica. Granuli detritici di quarzo e calcite sono frequentemente intrappolati nella struttura ramificata del travertino e avvolti dalle successive fasi di crescita del carbonato. I vuoti sono sempre numerosi e il più delle volte irregolari. La loro natura può essere duplice, trattandosi in un caso di cavità primarie create per mancata precipitazione di  $\text{CaCO}_3$ , nell'altro di vuoti lasciati

in seguito alla decomposizione dei supporti vegetali incrostatati. Nel primo caso le pareti delle cavità sono comunemente rivestite una o più lamine concentriche di cristalli di calcite colonnare o aciculare con disposizione radiale; talvolta il riempimento delle cavità è completato da un nucleo di sparite, formato da un aggregato di cristalli limpidi equidimensionali con struttura a mosaico. Nel secondo caso la sostanza organica, ormai decomposta, è stata sostituita da riempimenti di calcite limpida che riproduce nel dettaglio i particolari morfologici dell'organismo (Fig. 3a).

#### *Travertini stromatolitici*

Il principale carattere distintivo dei travertini stromatolitici è la presenza di una tipica struttura laminare visibile sia alla scala dell'affioramento sia alla scala microscopica. Nel primo caso l'osservazione dei campioni permette di evidenziare chiaramente la ripetuta sovrapposizione di distinti livelli, sottolineati da alternanze cromatiche variabili dal giallo miele al marrone scuro. Lo spessore delle singole lamine, che può raggiungere la decina di millimetri, non è mai costante. L'unica eccezione è rappresentata dall'estesa colata stromatolitica individuata in Val Chisone, nei pressi dell'abitato di Prigelato, costituita dalla ripetuta e regolare sovrapposizione di lamine millimetriche per uno spessore complessivo di alcuni metri: valori costanti nei tassi di accrescimento della calcite sembrerebbero indicare condizioni di relativa stabilità dei fattori di controllo del processo di precipitazione. La geometria delle lamine varia da piano-parallela orizzontale a piano-parallela ondulata e riflette, soprattutto nelle fasi di crescita iniziali, le caratteristiche morfologiche del substrato su cui poggiano. Frequente è il caso di lamine che mostrano evidenti rapporti di *onlap* su altri gruppi di lamine precedentemente deposte.

L'esame microscopico consente di evidenziare come le singole lamine siano formate dall'alternanza di un sottile livello di calcite microcristallina di colore scuro con una banda calcitica macrocristallina di maggiore spessore, più limpida e di colore chiaro. La prima costituisce la porzione inferiore delle lamine ed è formata da un aggregato di cristalli equidimensionali, irregolarmente orientati nello spazio. Con il procedere dei processi di precipitazione, questo aggregato caotico di calcite lascia gradualmente spazio a orizzonti contraddistinti da una maggiore organizzazione degli individui, poi seguiti dalla rapida crescita della calcite colonnare (Figg. 3b e 3c). In quest'ultimo caso i cristalli sono otticamente e geometricamente isoorientati con asse di allungamento maggiore coincidente con l'asse cristallografico "c" e perpendicolare alle superfici di accrescimento. La lunghezza dei singoli individui il più delle volte è inferiore o uguale allo spessore della lamina, mentre in altri casi può attraversare indifferentemente interi gruppi di lamine. Nei punti di curvatura della superficie di appoggio i cristalli mostrano una disposizione a ventaglio, marcata dall'estinzione radiale. Il contatto tra coppie di lamine è netto e sottolineato da piccoli frammenti detritici di quarzo o calcite e dal brusco passaggio da calcite colonnare macrocristallina a calcite isodiametrica microcristallina. Le discontinuità sono frequentemente accompagnate dalla netta troncatura dei cristalli di calcite, particolarità

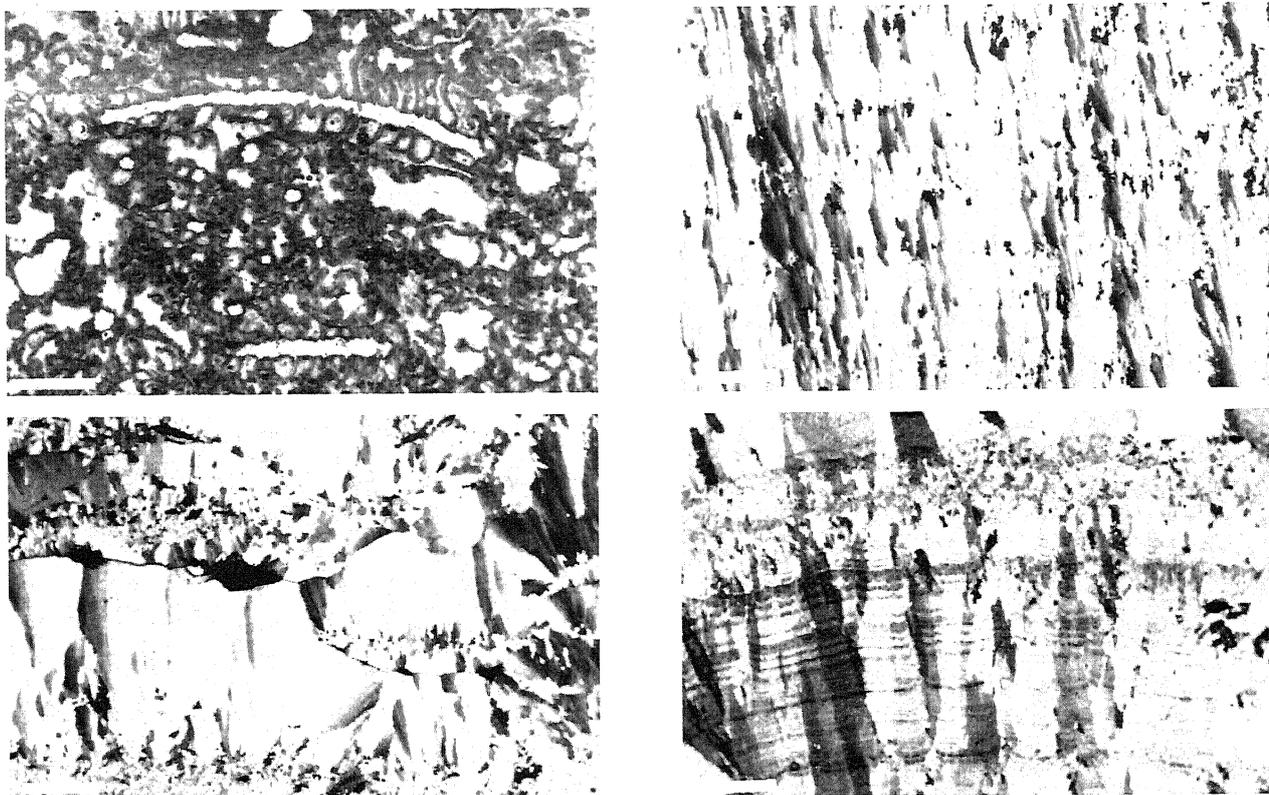


Fig. 3 - a) Microfotografia di travertino fitoermale (Oulx, Valle di Susa). Impronte di organismi vegetali immerse in un aggregato micritico. Nicols paralleli, scala = 0,34 mm; b) Microfotografia di travertino stromatolitico (Pragelato, Val Chisone). Livelli di calcite colonnare alternati a sottili livelli di calcite microcristallina. Nicols incrociati, scala = 0,76 mm; c) Microfotografia di travertino stromatolitico (Rochemolles, Valle di Susa). Livelli di calcite colonnare a ventaglio sottolineati da lamine di origine organica. Nicols incrociati, scala = 1,48 mm; d) Microfotografia di travertino stromatolitico (Chiomonte, Valle di Susa). Alternanza di lamine tessiturali e di lamine organiche. Nicols incrociati, scala = 2,0 mm;

a) Photomicrograph of a phytohermal travertine (Oulx, Susa Valley). Moulds of vegetal origin filled with sparry calcite in a micritic dark groundmass. Plane light, scale bar = 0.34 mm; b) Photomicrograph of a stromatolitic travertine (Pragelato, Chisone Valley). Alternating laminae with different crystal sizes (columnar and microsparitic). Crossed nicols, scale bar = 0.76 mm; c) Photomicrograph of a stromatolitic travertine (Rochemolles, Susa Valley). Spatic calcite with fan-shaped arrangement outline with thin organic laminae. Crossed nicols, scale bar = 1.48 mm; d) Photomicrograph of a stromatolitic travertine (Chiomonte, Susa Valley). Alternating textural and organic laminae with irregular spacing. Crossed nicols, scale bar = 2.0 mm ;

che concorre ad attribuirne il significato di superfici erosionali o di mancata sedimentazione. I domini di calcite microcristallina segnalerebbero invece l'elevato numero di nuclei di accrescimento disponibili e l'inizio di un nuovo episodio di crescita (Borsato, 1995). All'interno dei domini di calcite colonnare sono frequentemente presenti locali discontinuità intralaminari, individuate da piccoli aggregati di calcite microcristallina: i primi mostrano tuttavia di aver proseguito indisturbati la propria crescita avvolgendo completamente i nuclei. Il contatto tra le lamine è di tanto in tanto interrotto da cavità lenticolari interlaminari sindeposizionali variamente allungate parallelamente alle superfici di accrescimento.

Le lamine tessiturali sono attraversate in più punti da livelli di microinclusioni di sostanza organica che conferiscono un aspetto opaco, meno trasparente e più scuro del carbonato (Figg. 3d e 4a). Lo spessore delle lamine "organiche" è estremamente contenuto (qualche decina di  $\mu\text{m}$ ): queste tuttavia possono sovrapporsi ripetutamente a formare bande di colore scuro, soprattutto al passaggio da una lamina all'altra. L'andamento dei livelli opachi, sebbene ricalchi a grandi linee l'andamento

della laminazione tessiturale, nel dettaglio si mostra alquanto più complesso: si passa da profili lineari o blandamente ondulati a morfologie spiccatamente lobate, per giungere infine a caratteristici profili a dente di sega, formati dalla ciclica alternanza di culminazioni appuntite e profondi solchi. I diversi profili ricalcano la struttura cristallografica della calcite registrandone in tal modo le variazioni nelle modalità di accrescimento delle superfici dei cristalli.

I travertini stromatolitici costituiscono colate di spessore compreso tra pochi centimetri e alcuni metri, con espressioni morfologiche diversificate in relazione all'irregolarità della superficie su cui poggiano e alle diverse modalità di scorrimento delle acque calcarizzanti. In base all'espressione morfologica si distinguono stromatoliti a duomo e stromatoliti planari. Le prime sono costituite da concrezioni mammellonari o domiformi irregolarmente spaziate; i singoli emisferoidi hanno un'altezza inferiore alla decina di centimetri ed un diametro compreso tra 10 e 30 cm. Le stromatoliti planari sono invece contraddistinte da una maggiore regolarità della superficie, eventualmente sottolineata da blande ondu-

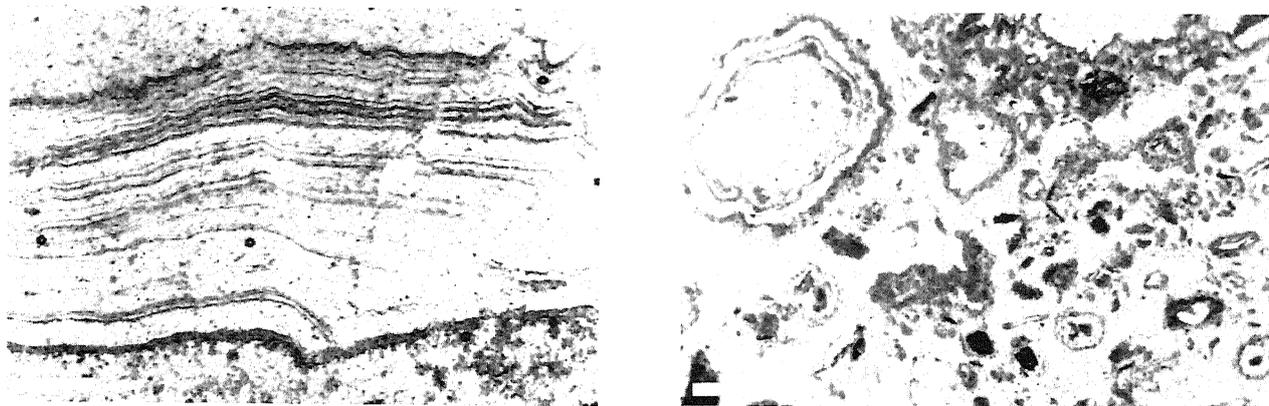


Fig. 4 - a) Microfotografia di travertino stromatolitico (Chiomonte, Valle di Susa). Livelli di limpida calcite spatica attraversati da scure microlaminazioni organiche. Nicols paralleli, scala = 0,82 mm. b) Microfotografia di travertino clastico (Pragelato, Valle di Susa). Aggregato di frammenti detritici immersi in una matrice sraritica. Nicols paralleli, scala = 0,66 mm.

a) Photomicrograph of a stromatolitic travertine (Chiomonte, Susa Valley). Laminae of clear spatic calcite crossed by dark organic microlaminae. Plane light, scale bar = 0.82 mm. b) Photomicrograph of a clastic travertine (Pragelato, Chisone Valley). Aggregate of pebbles embedded in a microsparry groundmass. Plane light, scale bar = 0.66 mm.

lazioni o da strutture a *ripple*. L'andamento planare è talvolta da ricercarsi nel progressivo accrescimento verticale delle colate, con l'effetto di regolarizzare le originarie asperità dell'appoggio basale.

Sulla superficie delle colate planari non è infrequente osservare increspature dovute alla presenza di ondulazioni a piccola scala o di microterrazzette. Queste hanno altezze e larghezze inferiori al centimetro e una disposizione tale da formare una gradinata progrediente nel senso di deflusso delle acque.

#### Travertini clastici

Sono costituiti da incrostazioni carbonatiche su supporti di varia natura: resti e frammenti di vegetazione arbustiva e arborea (foglie, rami e frustoli vegetali), oppure clasti provenienti dallo smantellamento di corpi travertinosi in corso di rimodellamento. Frequente è anche la presenza di frammenti detritici provenienti dall'erosione delle coltri di alterazione superficiali o del substrato roccioso. I clasti, di taglia arenitica o ruditica, sono raccolti in livelli di spessore centimetrico o decimetrico grossolanamente stratificati. Fra i caratteri distintivi si individuano l'elevata percentuale di vuoti e la mancanza di gradazione dei clasti. Il cemento costituisce delle patine che avvolgono interamente i clasti e li saldano nei punti di contatto, ed è formato da un aggregato di spatite limpida e micrite opaca e ricca di inclusioni organiche. Numerose cavità mostrano una zonatura concentrica in relazione alla ripetuta deposizione di livelli di calcite con diversa struttura e limpidezza (Fig. 4b).

All'interno della facies clastica non è raro individuare livelli di travertino bibliolitico (*sensu* D'Argenio & Ferreri, 1986), costituito da incrostazioni carbonatiche su singole foglie o su gruppi di foglie riferibili a essenze tuttora presenti lungo i versanti. Le foglie sono regolarmente impacchettate l'una sull'altra assumendo talvolta una disposizione embricata. La sostanza organica è del tutto assente e l'originaria presenza delle foglie è testimoniata dalle numerose impronte sulle quali sono fedel-

mente riprodotte, anche nei minimi dettagli, le strutture vegetali.

I livelli clastici così come la facies bibliolitica non danno luogo a particolari espressioni morfologiche, costituendo sempre intercalazioni di modesto spessore ed estensione all'interno dei travertini fitoermali e stromatolitici.

#### Speleotemi

Molte cavità sindeposizionali all'interno di alcuni corpi travertinosi sono spesso sottolineate dalla presenza sulle pareti di depositi concrezionari (es. Vallone di Rochemolles). La struttura laminata è dovuta alla ripetuta sovrapposizione di livelli di calcite micro- e macrocristallina, con disposizione analoga a quella individuata nei travertini stromatolitici. A differenza di questi ultimi le laminazioni "organiche" sono però più rade e meno evidenti. Non è raro osservare irregolari cavità millimetriche tappezzate da cristalli idiomorfi di calcite spatica.

La morfologia assunta da queste concrezioni è estremamente diversificata in funzione dell'ambiente di precipitazione e delle condizioni idrodinamiche. Sebbene si tratti di depositi volumetricamente poco sviluppati, gli speleotemi danno luogo a una ricca varietà di forme e tipologie di incrostazione. Fra le più frequenti si segnalano stalattiti e drappaggi, formati in seguito a processi di percolazione e gocciolamento dalla sommità delle cavità. Forma e sezione sono il più delle volte irregolari con dimensioni (le stalattiti non superano alcuni decimetri di altezza) proporzionate all'esiguo spazio a disposizione. Il fondo delle cavità è rivestito da colate stalagmitiche sulla cui superficie si individuano comunemente tipiche microterrazzette o morfologie mammellonari riconducibili alla presenza di flussi laminari. Le colate hanno spessori variabili ma localmente possono accrescersi per valori prossimi al metro. La formazione degli speleotemi cancella o quanto meno attenua le preesistenti irregolarità presenti sulle pareti delle cavità, mascheran-

do depressioni ed asperità dalla superficie rocciosa che viene lentamente livellata.

## 5. ASSOCIAZIONI DI FACIES E AMBIENTI DEPOSITIVOLI

La molteplicità dei parametri (chimico-fisici, biologici e ambientali) e le possibili, infinite combinazioni che intervengono nella deposizione del carbonato di calcio, trovano riscontro nell'ampia variabilità tipologica dei travertini. Il carattere frammentario dello studio effettuato su un elevato numero di affioramenti non consente di fornire una dettagliata ed esaustiva descrizione di tutte le casistiche individuate. Nonostante queste limitazioni si è tentato di analizzare e caratterizzare alcune associazioni che, più di altre, sembrano ricorrere con maggiore frequenza. La possibilità di osservare fenomeni di concrezionamento attualmente in evoluzione consente di inquadrare più agevolmente le singole associazioni di facies in più ampi contesti morfologico-ambientali e idrologici. Per quanto caratterizzati da un'estrema variabilità degli ambienti deposizionali è stato quindi possibile descrivere le varie morfologie seguendo la classificazione proposta da Pedley (1990).

*Travertini di versante* (perched springline model; Pedley, 1990)

Rappresenta il modello deposizionale più comunemente osservato nell'area di studio. La precipitazione del travertino avviene in prossimità di sorgenti puntiformi o di aree di risorgenza, localizzate lungo il pendio o in incisioni torrentizie più o meno marcate. Il travertino poggia su coltri di sedimenti sciolti di varia natura (detrattici, glaciali o gravitativi), più raramente su substrato roccioso, ricalcando l'andamento locale del versante. Un livello di brecce a cemento travertinoso, con potenza decimetrica e talvolta metrica, più o meno discontinuo segna l'inizio della sequenza deposizionale. Verso l'alto questa prosegue con il rapido passaggio a travertini fitoermali, a costituire semplici crostoni superficiali di pochi decimetri di spessore oppure caratteristiche morfologie domiformi o a cuscino con altezze di alcuni metri (Fig. 5).

In altri casi alle brecce basali si sovrappongono colate di travertino stromatolitico che attenuano le irregolarità dei corpi breccioidi. La progradazione del travertino verso valle a partire dal punto di risorgenza dà luogo a singolari morfologie conoidiformi, con spessori che in taluni casi possono raggiungere valori di 5÷6 m (Fig. 6).

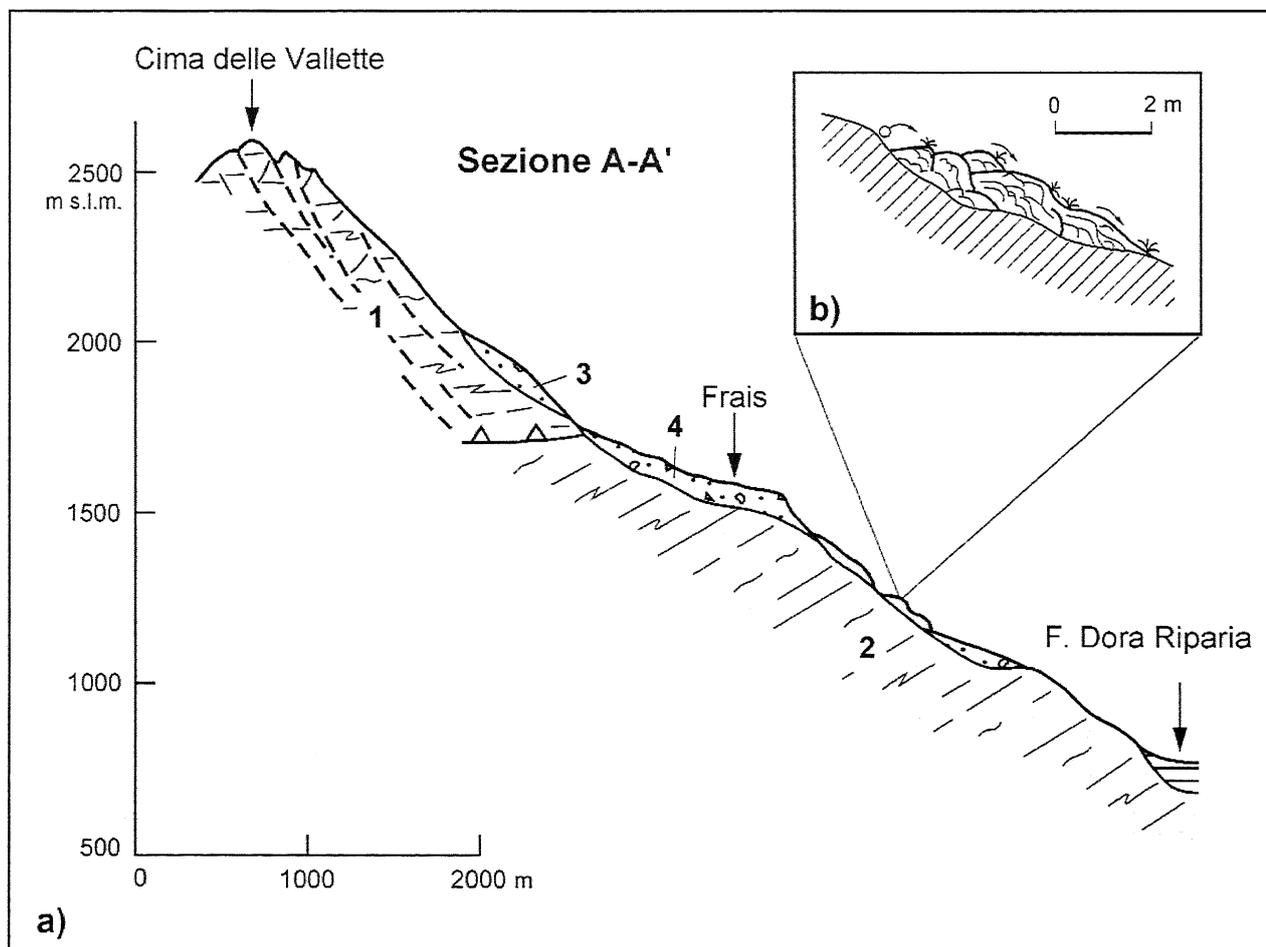


Fig. 5 - a) Sezione geologica schematica A-A' (traccia in Fig. 2). 1 = Unità del Lago Nero; 2 = Complesso di Venaus; 3 = accumulo gravitativo; 4 = depositi glaciali. b) Particolare del travertino fitoermale.

a) Schematic geological section A-A' (see Fig. 2 for locations). 1 = Lago Nero Unit; 2 = Venaus Complex; 3 = landslide deposit; 4 = glacial till. b) Detail of phytothermal travertine.

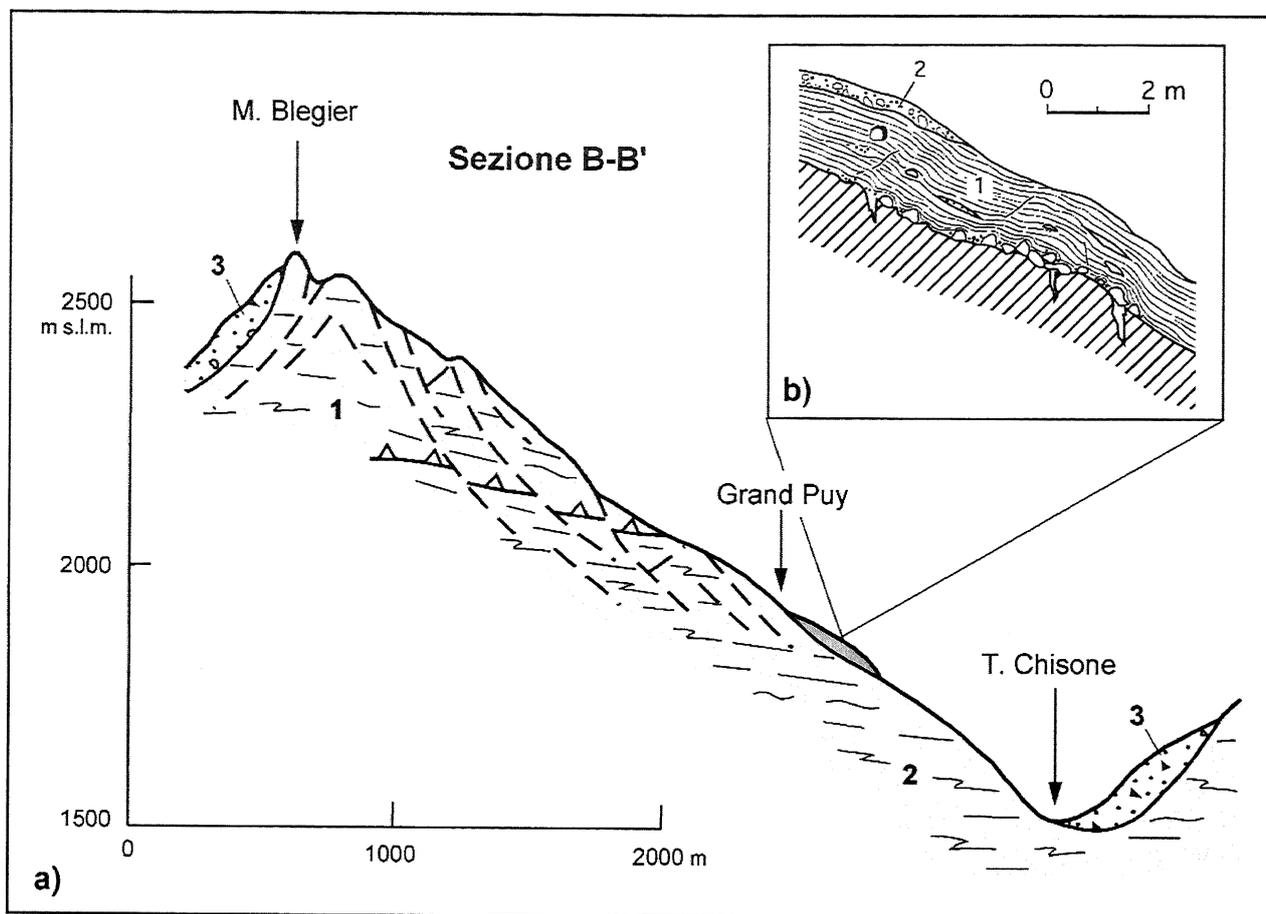


Fig. 6 - a) Sezione geologica schematica B-B' (traccia in Fig. 2). 1 = Unità del Lago Nero; 2 = Unità di Cerogne - Ciantiplagna; 3 = accumulo gravitativo. b) Particolare del travertino stromatolitico. 1 = travertino stromatolitico; 2 = coltre detritico-colluviale.

a) Schematic geological section B-B' (see Fig. 2 for locations). 1 = Lago Nero Unit; 2 = Cerogne - Ciantiplagna Unit; 3 = landslide deposit. b) Detail of stromatolitic travertine. 1 = stromatolitic travertine; 2 = colluvial and detrital deposits.

Repentine variazioni nell'assetto morfologico locale possono indurre variazioni nelle modalità di deflusso delle acque superficiali e condizionare il tipo di vegetazione a spese della quale si sviluppano i processi di incrostazione. In uno stesso affioramento si osservano comunemente ripetute transizioni di facies, da fitoermale a stromatolitico e viceversa, a testimoniare la dinamicità dell'ambiente di deposizione dei travertini.

#### *Travertini di cascata (cascade model; Pedley, 1990)*

Scarpate e gradini rocciosi ubicati lungo i versanti e lungo il reticolato idrografico minore determinano un aumento della turbolenza delle acque di ruscellamento. La drastica diminuzione della pressione parziale di  $\text{CO}_2$  nelle acque in condizioni di saturazione o sovrasaturazione si traduce nell'improvvisa precipitazione del carbonato in forma di crostoni e colate subverticali di travertino fitoermale. Ne sono un esempio i lembi di travertino individuati nei pressi degli abitati di Chiomonte e Oulx, con altezze che raggiungono una decina di metri: la precipitazione di  $\text{CaCO}_3$  avviene in questi casi su substrato roccioso fratturato, e il protrarsi dei fenomeni di incrostazione dà luogo alla graduale progradazione

del corpo travertinoso che in alcuni punti si trova sospeso nel vuoto.

#### *Travertini di sbarramento fluviale (barrage model; Pedley, 1990)*

L'analisi dei livelli clastici conservati all'interno dei corpi travertinosi non più in rapporto con le acque mineralizzanti, non consente di trarre utili indicazioni sulle caratteristiche dell'ambiente deposizionale. Un quadro più circostanziato è invece fornito dall'osservazione del reticolo idrografico minore attuale, lungo il quale sono stati più volte individuati piccoli ristagni d'acqua che permettono l'accumulo di materiale vegetale fluitato ai margini delle pozze (Fig. 7). La formazione di effimeri sbarramenti induce un incremento delle condizioni di turbolenza della corrente, il rapido rilascio di anidride carbonica e lo spostamento degli equilibri chimici verso condizioni di sovrasaturazione in  $\text{CaCO}_3$ . L'accentuazione dei processi di calcarizzazione consentono la stabilizzazione degli sbarramenti, l'innalzamento del livello dell'acqua e l'ulteriore accumulo lungo il bordo di resti vegetali, presupposto per l'attecchimento di muschi e vegetazione igrofila. Nella parte centrale delle vaschette

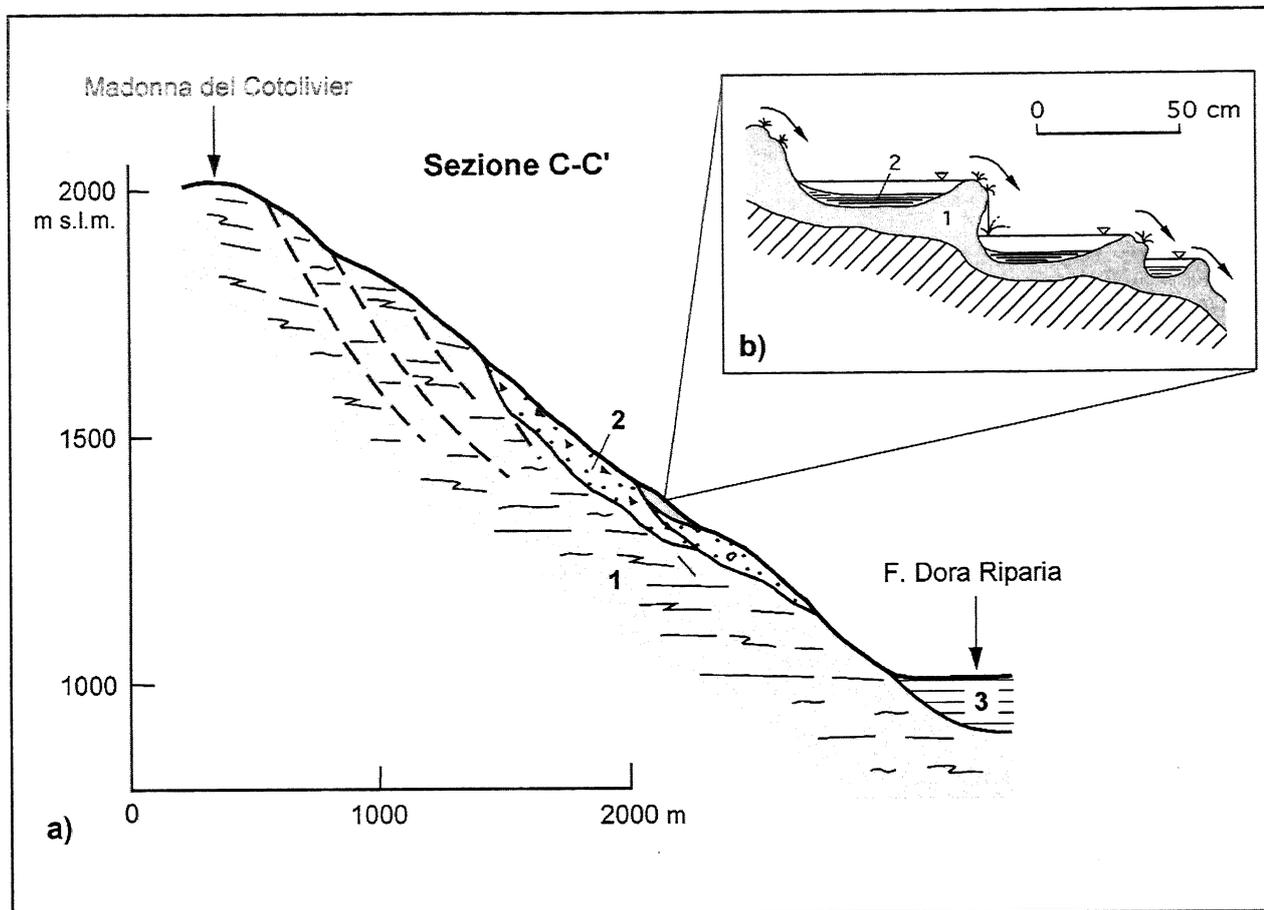


Fig. 7 - a) Sezione geologica schematica C-C' (traccia in Fig. 2). 1 = Complesso di Puys; 2 = accumulo gravitativo; 3 = depositi alluvionali. b) Particolare del travertino clastico. 1 = travertino clastico consolidato; 2 = travertino clastico non consolidato.

a) Schematic geological section C-C' (see Fig. 2 for locations). 1 = Puys Complex; 2 = landslide deposit; 3 = alluvial deposits. b) Detail of clastic travertine. 1 = consolidated clastic travertine; 2 = unconsolidated clastic travertine.

predominano invece i processi di sedimentazione, che danno luogo ad accumuli di materiale detritico poco o per nulla cementato. I rapidi processi di concrezionamento a spese della vegetazione ivi presente conducono all'edificazione di sbarramenti di travertino fitoeremale disposti longitudinalmente alla direzione di deflusso delle acque e all'innalzamento locale del livello delle vaschette. Ne risulta una tipica successione di terrazzi progredienti verso valle: ciascuno di essi è occupato da pozze d'acqua con superficie inferiore al metro quadrato, separato dagli altri da gradini con altezze di alcune decine di centimetri.

## 6. IPOTESI GENETICHE

La formazione del travertino rappresenta l'ultima tappa di un complesso fenomeno chimico-fisico di solubilizzazione, trasporto e riprecipitazione del  $\text{CaCO}_3$ . Perché il processo possa avere luogo è necessaria la disponibilità di un mezzo acquoso in grado di mobilitare le sostanze mineralizzanti e di rocce sorgenti in grado di fornire in sufficienti quantità la componente carbonatica.

La prima condizione è soddisfatta dalla diffusa presenza di acque di infiltrazione di origine meteorica, affio-

ranti in corrispondenza delle numerose manifestazioni sorgentizie distribuite soprattutto lungo i versanti modellati nelle unità a calcescisti.

Una significativa parte dei deflussi si svolge all'interno delle coltri di depositi superficiali e all'interfaccia con il substrato roccioso. L'intersezione delle falde freatiche con la superficie topografica è marcata dalla presenza di sorgenti spesso allineate, il più delle volte caratterizzate da modesti valori di portata. Il carattere pellicolare dei circuiti idrici determina significative variazioni nei valori di deflusso delle sorgenti, che mostrano di dipendere strettamente dall'andamento stagionale delle precipitazioni, tanto da esaurirsi nei periodi siccitosi. Portate permanenti e costanti, valori uniformi della temperatura e una tendenza a manifestare un maggiore vigore nei fenomeni di concrezionamento, indicherebbero una circolazione idrica relativamente più profonda, con acquiferi ospitati in ammassi rocciosi fratturati.

L'apporto di carbonato di calcio al sistema è invece garantito dall'estensiva presenza di un substrato costituito da successioni a prevalenti calcescisti. Queste ultime, per quanto caratterizzate nel dettaglio da un assetto litostratigrafico assai complesso, costituiscono una fonte pressoché inesauribile di  $\text{CaCO}_3$ , sia pure con concentrazioni che possono variare si-

gnificativamente da luogo a luogo: elevate nei calcescisti marmorei e nei marmi puri, trascurabili nei calcescisti filladici e grafitici. Anche le successioni di copertura mesozoiche, costituite in netta prevalenza da rocce calcaree e dolomitiche facilmente carsificabili, sono in grado di fornire carbonato di calcio ai circuiti idrici sotterranei: ne sono conferma i numerosi lembi di breccie a cemento carbonatico dell'Unità del Segurét - La Riposa (Servizio Geologico d'Italia, 1999) ricondotte allo sviluppo di intensi processi di dissoluzione e riprecipitazione in ambiente ipogeo (Dela Pierre *et al.*, 1999). Come sottolineato in precedenza, tuttavia, alla presenza di calcari e dolomie si contrappone la quasi assoluta mancanza di concrezioni travertinose nei loro areali di affioramento: una risposta può essere fornita considerando anche il ruolo dell'assetto strutturale del substrato, sia esso legato all'evoluzione tettonica fragile alpina e post-alpina, sia alle più recenti fasi di strutturazione della catena.

Rilevanti fenomeni di concrezionamento superficiale sono stati talvolta individuati in prossimità di alcune strutture tettoniche regionali. In particolare si segnalano:

- sul versante destro della Valfredda, principale tributario del T. Rochemolles, alcuni lembi di travertino sottolineano in modo discontinuo il contatto tettonico a basso angolo che separa l'Unità dell'Aigle dalla sottostante Unità di Valfredda;

- sul versante sud-occidentale del M. Genevris lembi di travertino sono localizzati in prossimità del sovrascorrimento che separa l'Unità di Cerogne - Ciantiplagna da quella del Lago Nero;

- numerosi corpi di travertino sono localizzati nei pressi del Gad d'Oulx, a breve distanza dalla faglia subverticale diretta ENE-WSW che separa l'Unità di Gad dall'Unità di Cerogne - Ciantiplagna.

Le condizioni di affioramento del substrato roccioso sono tali da non permettere l'osservazione diretta delle strutture descritte. E' tuttavia indubbio che l'intensa fratturazione delle rocce in prossimità dei contatti tettonici, soprattutto se contraddistinti da un notevole sviluppo longitudinale, faciliti la circolazione delle acque condizionando la distribuzione dei prodotti di dissoluzione e riprecipitazione della frazione carbonatica. Queste evidenze, per quanto incerte, sono confermate da analoghe osservazioni effettuate da Debenedetti & Turi (1975) per alcuni affioramenti di "tufi calcarei" segnalati in alcune località della Valle d'Aosta.

Più circostanziato è invece il ruolo assunto dalle deformazioni gravitative profonde, che coinvolgono estensivamente ampi settori della Valle di Susa e della Val Chisone (cfr. Figg. 5a, 6a e 7a). L'instaurarsi nei versanti di lenti e progressivi fenomeni di collasso con meccanismi di *creep* profondo, inducono sostanziali fenomeni di rilascio e disarticolazione del substrato e al contempo un aumento del volume della massa coinvolta (Radbruch-Hall, 1978): questo si traduce in una variazione nella frequenza, distribuzione e apertura delle discontinuità nell'ammasso roccioso che inducono, in ultima analisi, sostanziali variazioni nelle modalità di circolazione delle acque sotterranee. Tale situazione si riflette in un incremento della permeabilità e della superficie specifica drenata rispetto ad ammassi rocciosi indeformati. Un elevato grado di fratturazione conduce alla rapida saturazione delle acque meteoriche di infiltrazione e rappre-

presenta quindi un elemento catalizzante dei fenomeni di dissoluzione del carbonato di calcio. L'ipotesi è confermata dall'osservazione, effettuata in diverse località della Valle di Susa, dei punti di intersezione della superficie topografica con i piani di scivolamento gravitativo: sulla superficie di detti piani è piuttosto frequente individuare estesi rivestimenti concrezionari, di spessore compreso tra pochi millimetri e alcuni centimetri, sui quali sono talora impresse le tracce (in forma di strie di calcite) dei movimenti di dislocazione avvenuti. In accordo con l'interpretazione fornita da alcuni Autori (AA.VV., 1996), le concrezioni deriverebbero da una circolazione idrica di tipo "carsico" sviluppatasi in corrispondenza di fratture beanti all'interno del versante.

L'assenza di travertino sulla superficie di pendii modellati in rocce calcareo-dolomitiche sarebbe invece da ricercare nella scarsa predisposizione di questi litotipi a ospitare fenomeni di dislocazione e pervasiva fratturazione di natura gravitativa (Mortara & Sorzana, 1987). Concorrerebbe inoltre l'assenza di una circolazione idrica superficiale, caratteristica che contraddistingue i substrati di natura carbonatica, che si contrappone alla frequente presenza di circuiti carsici attualmente in evoluzione (es. M. Segurét).

La dinamicità degli ambienti studiati sembra inoltre giustificare l'elevato numero di località nelle quali le masse travertinose non risultano attualmente in rapporto con acque mineralizzate. L'evoluzione dei rilievi avviene infatti con prevalenti fenomeni di carattere gravitativo, la cui evoluzione modifica nel tempo la geometria e le condizioni di permeabilità degli acquiferi. Le variazioni così indotte nei circuiti idrici sotterranei causano spesso la rapida scomparsa di sorgenti calcarifere e la comparsa di nuove. La mancata alimentazione da parte delle acque mineralizzate è seguita immediatamente dai processi di rimodellamento erosionale, con effetti che consistono nella disaggregazione e disarticolazione dei corpi travertinosi. Il perdurare dei processi erosivi conduce dapprima alla formazione di modeste incisioni superficiali, successivamente alla completa dissezione degli ammassi operata dalle acque incanalate. Talvolta il rimodellamento si spinge a tal punto da determinare la rotazione delle masse travertinose per scalzamento alla base o il coinvolgimento in fenomeni gravitativi. In altri e più frequenti casi i travertini vengono parzialmente sepolti per effetto di fenomeni franosi o di più modeste colate di detrito che rimobilizzano la coltre di depositi superficiali.

## 7. CONCLUSIONI

I travertini della Valle di Susa e della Val Chisone rappresentano un elemento distintivo nell'evoluzione quaternaria recente di queste aree. I fenomeni che hanno condotto alla precipitazione del carbonato di calcio sono da ascrivere all'intervento di fluidi meteorici fortemente arricchiti in questa sostanza. I circuiti idrici responsabili della veicolazione delle acque mineralizzate sono impostati in ammassi rocciosi caratterizzati da successioni metasedimentarie a prevalenti calcescisti e in potenti ed estesi accumuli di frana formati a spese di questi ultimi. L'elevato grado di fratturazione e disarticolazione del substrato costi-

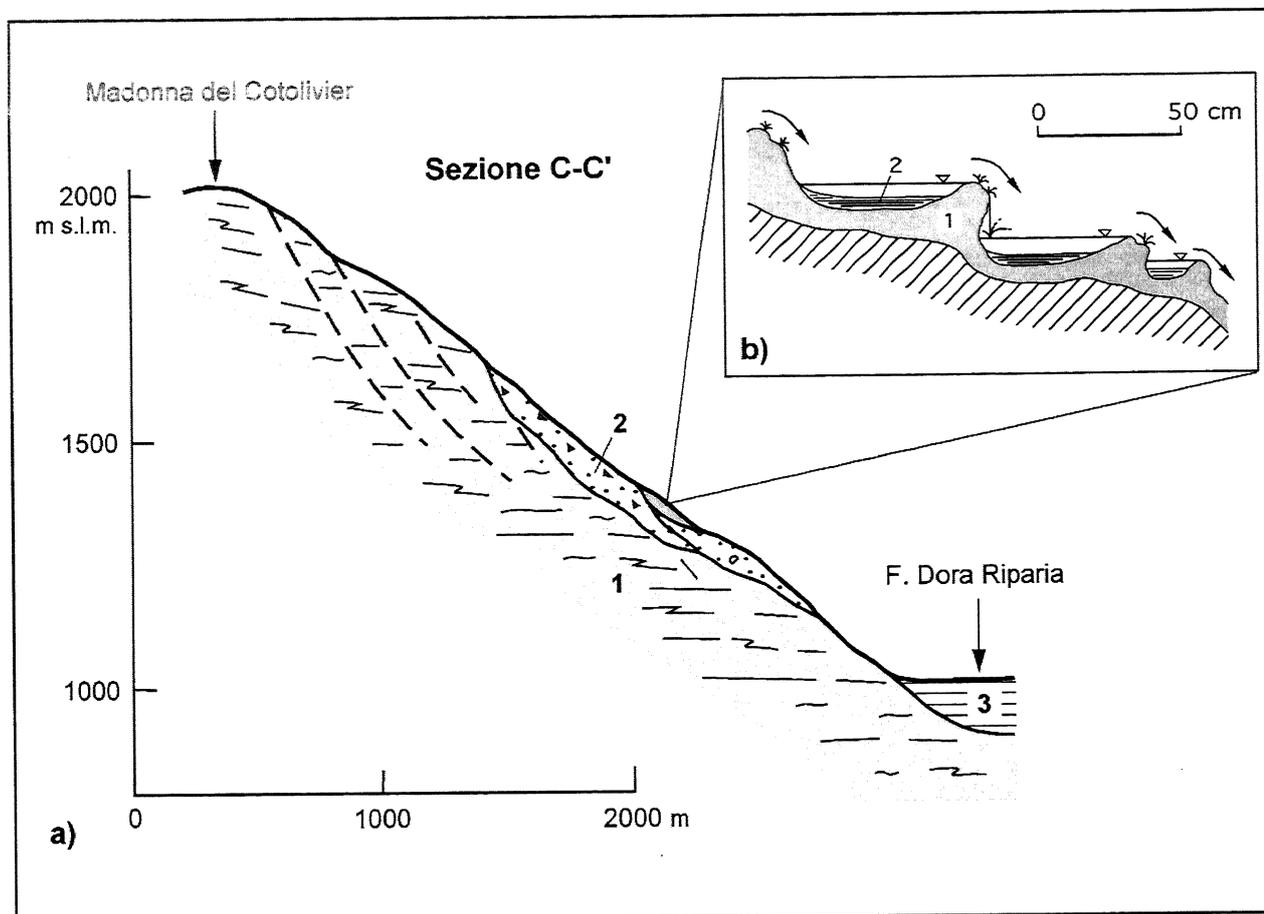


Fig. 7 - a) Sezione geologica schematica C-C' (traccia in Fig. 2). 1 = Complesso di Puys; 2 = accumulo gravitativo; 3 = depositi alluvionali. b) Particolare del travertino clastico. 1 = travertino clastico consolidato; 2 = travertino clastico non consolidato.

a) Schematic geological section C-C' (see Fig. 2 for locations). 1 = Puys Complex; 2 = landslide deposit; 3 = alluvial deposits. b) Detail of clastic travertine. 1 = consolidated clastic travertine; 2 = unconsolidated clastic travertine.

predominano invece i processi di sedimentazione, che danno luogo ad accumuli di materiale detritico poco o per nulla cementato. I rapidi processi di concrezionamento a spese della vegetazione ivi presente conducono all'edificazione di sbarramenti di travertino fitoermale disposti longitudinalmente alla direzione di deflusso delle acque e all'innalzamento locale del livello delle vaschette. Ne risulta una tipica successione di terrazzi progradanti verso valle: ciascuno di essi è occupato da pozze d'acqua con superficie inferiore al metro quadrato, separato dagli altri da gradini con altezze di alcune decine di centimetri.

## 6. IPOTESI GENETICHE

La formazione del travertino rappresenta l'ultima tappa di un complesso fenomeno chimico-fisico di solubilizzazione, trasporto e riprecipitazione del  $\text{CaCO}_3$ . Perché il processo possa avere luogo è necessaria la disponibilità di un mezzo acquoso in grado di mobilizzare le sostanze mineralizzanti e di rocce sorgenti in grado di fornire in sufficienti quantità la componente carbonatica.

La prima condizione è soddisfatta dalla diffusa presenza di acque di infiltrazione di origine meteorica, affio-

ranti in corrispondenza delle numerose manifestazioni sorgentizie distribuite soprattutto lungo i versanti modellati nelle unità a calcescisti.

Una significativa parte dei deflussi si svolge all'interno delle coltri di depositi superficiali e all'interfaccia con il substrato roccioso. L'intersezione delle falde freatiche con la superficie topografica è marcata dalla presenza di sorgenti spesso allineate, il più delle volte caratterizzate da modesti valori di portata. Il carattere pellicolare dei circuiti idrici determina significative variazioni nei valori di deflusso delle sorgenti, che mostrano di dipendere strettamente dall'andamento stagionale delle precipitazioni, tanto da esaurirsi nei periodi siccitosi. Portate permanenti e costanti, valori uniformi della temperatura e una tendenza a manifestare un maggiore vigore nei fenomeni di concrezionamento, indicherebbero una circolazione idrica relativamente più profonda, con acquiferi ospitati in ammassi rocciosi fratturati.

L'apporto di carbonato di calcio al sistema è invece garantito dall'estensiva presenza di un substrato costituito da successioni a prevalenti calcescisti. Queste ultime, per quanto caratterizzate nel dettaglio da un assetto litostratigrafico assai complesso, costituiscono una fonte pressoché inesauribile di  $\text{CaCO}_3$ , sia pure con concentrazioni che possono variare si-

gnificativamente da luogo a luogo: elevate nei calcescisti marmorei e nei marmi puri, trascurabili nei calcescisti filladici e grafitici. Anche le successioni di copertura mesozoiche, costituite in netta prevalenza da rocce calcaree e dolomitiche facilmente carsificabili, sono in grado di fornire carbonato di calcio ai circuiti idrici sotterranei: ne sono conferma i numerosi lembi di brecce a cemento carbonatico dell'Unità del Segurét - La Riposa (Servizio Geologico d'Italia, 1999) ricondotte allo sviluppo di intensi processi di dissoluzione e riprecipitazione in ambiente ipogeo (Dela Pierre *et al.*, 1999). Come sottolineato in precedenza, tuttavia, alla presenza di calcari e dolomie si contrappone la quasi assoluta mancanza di concrezioni travertinose nei loro areali di affioramento: una risposta può essere fornita considerando anche il ruolo dell'assetto strutturale del substrato, sia esso legato all'evoluzione tettonica fragile alpina e post-alpina, sia alle più recenti fasi di strutturazione della catena.

Rilevanti fenomeni di concrezionamento superficiale sono stati talvolta individuati in prossimità di alcune strutture tettoniche regionali. In particolare si segnalano:

- sul versante destro della Valfredda, principale tributario del T. Rochemolles, alcuni lembi di travertino sottolineano in modo discontinuo il contatto tettonico a basso angolo che separa l'Unità dell'Aigle dalla sottostante Unità di Valfredda;

- sul versante sud-occidentale del M. Genevris lembi di travertino sono localizzati in prossimità del sovrascorrimento che separa l'Unità di Cerogne - Ciantiplagna da quella del Lago Nero;

- numerosi corpi di travertino sono localizzati nei pressi del Gad d'Oulx, a breve distanza dalla faglia subverticale diretta ENE-WSW che separa l'Unità di Gad dall'Unità di Cerogne - Ciantiplagna.

Le condizioni di affioramento del substrato roccioso sono tali da non permettere l'osservazione diretta delle strutture descritte. E' tuttavia indubbio che l'intensa fratturazione delle rocce in prossimità dei contatti tettonici, soprattutto se contraddistinti da un notevole sviluppo longitudinale, faciliti la circolazione delle acque condizionando la distribuzione dei prodotti di dissoluzione e riprecipitazione della frazione carbonatica. Queste evidenze, per quanto incerte, sono confermate da analoghe osservazioni effettuate da Debenedetti & Turi (1975) per alcuni affioramenti di "tufi calcarei" segnalati in alcune località della Valle d'Aosta.

Più circostanziato è invece il ruolo assunto dalle deformazioni gravitative profonde, che coinvolgono estensivamente ampi settori della Valle di Susa e della Val Chisone (cfr. Figg. 5a, 6a e 7a). L'instaurarsi nei versanti di lenti e progressivi fenomeni di collasso con meccanismi di *creep* profondo, inducono sostanziali fenomeni di rilascio e disarticolazione del substrato e al contempo un aumento del volume della massa coinvolta (Radbruch-Hall, 1978): questo si traduce in una variazione nella frequenza, distribuzione e apertura delle discontinuità nell'ammasso roccioso che inducono, in ultima analisi, sostanziali variazioni nelle modalità di circolazione delle acque sotterranee. Tale situazione si riflette in un incremento della permeabilità e della superficie specifica drenata rispetto ad ammassi rocciosi indeformati. Un elevato grado di fratturazione conduce alla rapida saturazione delle acque meteoriche di infiltrazione e rappre-

senta quindi un elemento catalizzante dei fenomeni di dissoluzione del carbonato di calcio. L'ipotesi è confermata dall'osservazione, effettuata in diverse località della Valle di Susa, dei punti di intersezione della superficie topografica con i piani di scivolamento gravitativo: sulla superficie di detti piani è piuttosto frequente individuare estesi rivestimenti concrezionari, di spessore compreso tra pochi millimetri e alcuni centimetri, sui quali sono talora impresse le tracce (in forma di strie di calcite) dei movimenti di dislocazione avvenuti. In accordo con l'interpretazione fornita da alcuni Autori (AA.VV., 1996), le concrezioni deriverrebbero da una circolazione idrica di tipo "carsico" sviluppatasi in corrispondenza di fratture beanti all'interno del versante.

L'assenza di travertino sulla superficie di pendii modellati in rocce calcareo-dolomitiche sarebbe invece da ricercare nella scarsa predisposizione di questi litotipi a ospitare fenomeni di dislocazione e pervasiva fratturazione di natura gravitativa (Mortara & Sorzana, 1987). Concorrerebbe inoltre l'assenza di una circolazione idrica superficiale, caratteristica che contraddistingue i substrati di natura carbonatica, che si contrappone alla frequente presenza di circuiti carsici attualmente in evoluzione (es. M. Segurét).

La dinamicità degli ambienti studiati sembra inoltre giustificare l'elevato numero di località nelle quali le masse travertinose non risultano attualmente in rapporto con acque mineralizzate. L'evoluzione dei rilievi avviene infatti con prevalenti fenomeni di carattere gravitativo, la cui evoluzione modifica nel tempo la geometria e le condizioni di permeabilità degli acquiferi. Le variazioni così indotte nei circuiti idrici sotterranei causano spesso la rapida scomparsa di sorgenti calcarifere e la comparsa di nuove. La mancata alimentazione da parte delle acque mineralizzate è seguita immediatamente dai processi di rimodellamento erosionale, con effetti che consistono nella disaggregazione e disarticolazione dei corpi travertinosi. Il perdurare dei processi erosivi conduce dapprima alla formazione di modeste incisioni superficiali, successivamente alla completa dissezione degli ammassi operata dalle acque incanalate. Talvolta il rimodellamento si spinge a tal punto da determinare la rotazione delle masse travertinose per scalzamento alla base o il coinvolgimento in fenomeni gravitativi. In altri e più frequenti casi i travertini vengono parzialmente sepolti per effetto di fenomeni franosi o di più modeste colate di detrito che rimobilizzano la coltre di depositi superficiali.

## 7. CONCLUSIONI

I travertini della Valle di Susa e della Val Chisone rappresentano un elemento distintivo nell'evoluzione quaternaria recente di queste aree. I fenomeni che hanno condotto alla precipitazione del carbonato di calcio sono da ascrivere all'intervento di fluidi meteorici fortemente arricchiti in questa sostanza. I circuiti idrici responsabili della veicolazione delle acque mineralizzate sono impostati in ammassi rocciosi caratterizzati da successioni metasedimentarie a prevalenti calcescisti e in potenti ed estesi accumuli di frana formati a spese di questi ultimi. L'elevato grado di fratturazione e disarticolazione del substrato costi-

tuisce l'elemento determinante per la rapida dissoluzione di cospicui quantitativi della frazione carbonatica di queste rocce altrimenti scarsamente carsificabili. Tale condizione è determinata dagli imponenti fenomeni di deformazione superficiale e profonda dei versanti e, indirettamente, dalla presenza di numerose ed importanti discontinuità strutturali.

L'elevata dinamicità morfologica dei versanti si riflette nella variabilità di facies riscontrata nei depositi concrezionari, rappresentati da travertino fitoermale, stromatolitico e clastico. L'osservazione dei processi di precipitazione attualmente in corso in prossimità delle numerose manifestazioni sorgentizie, ha inoltre permesso il riconoscimento di diverse forme di accumulo strettamente dipendenti dalla morfologia locale del versante. Il quadro di distribuzione del travertino ed i rapporti stratigrafici con gli altri depositi, concorrono infine nell'affermare che le condizioni di deposizione, attualmente ancora in atto in forma più o meno diffusa, sono presumibilmente iniziate successivamente al ritiro delle principali masse glaciali.

Il quadro analitico presentato e le interpretazioni fornite hanno al momento un significato locale. Ulteriori indagini, condotte anche esternamente all'area investigata, consentiranno di accertare se i meccanismi genetici prospettati possano avere un più ampio significato ed essere estesi anche ad altre aree dell'arco alpino.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. C. Carrara e il Prof. F. Carraro per la revisione critica del manoscritto e per i suggerimenti forniti.

Lavoro effettuato con fondi CNR - Centro di Studi sulla Geodinamica delle Catene Collisionali di Torino.

## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1996) - *Rischi generati da grandi movimenti franosi. Studio comparato di 4 siti nelle Alpi franco-italiane*. Regione Piemonte e Université J. Fourier (Lirigm). Programma INTERREG I Italia-Francia, 208 pp.
- Barféty J.C., Lemoine M., De Graciansky P.C., Tricart P. & Demercier D. (1995) - *Notice explicative de la feuille Briançon à 1/50.000*. Ministère de l'Industrie, BRGM, Service Géologique National, 180 pp.
- Borsato A. (1995) - *Ambiente di precipitazione e analisi microstratigrafica di speleotemi in grotte delle Dolomiti di Brenta e Valsugana (Trento): interpretazioni genetiche e implicazioni paleoclimatiche*. Università degli Studi di Milano. Dipartimento di Scienze della Terra. Tesi di Dottorato di Ricerca, VII Ciclo, 175 pp.
- Buccino G., D'Argenio B., Ferreri V., Brancaccio L., Ferreri M., Panichi C. & Stanzione D. (1978) - *I travertini della Bassa Valle del Tanagro (Campania). Studio geomorfologico, sedimentologico e geochimico*. Boll. Soc. Geol. It., **97**, 617-646.
- Capello C.F. (1942) - *Geomorfologia della regione ulzina (Valle di Susa)*. L'Universo, **23**, 1-16.
- Carrara C. (1991) - *Travertine deposits of the middle Liri Valley (Central Italy): geomorphological, sedimentological and geochemical study*. *Palaeoenvironmental and palaeoclimatic implications*. Il Quaternario, **4**(1a), 55-84.
- Chardon M. (1993) - *Les tufs de Monêtier-les-Bains (Briançonnaise): datations U/Th et sondages. Contribution à la connaissance de l'évolution morphologique d'une haute vallée alpine*. Revue de Géographie Alpine, **1**, 35-45.
- D'Argenio B., Ferreri V., Stanzione D., Brancaccio L. & Ferreri M. (1983) - *I travertini di Pontecagnano (Campania). Geomorfologia, sedimentologia, geochimica*. Boll. Soc. Geol. It., **102**, 123-136.
- D'Argenio B. & Ferreri V. (1986) - *A brief outline of sedimentary models for Pleistocene travertine accumulation in Southern Italy*. Rend. Soc. Geol. It., **9**(1987), 167-170.
- Debenedetti A. & Turi B. (1975) - *Carniole della Valle d'Aosta. Studio isotopico ed ipotesi genetica*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 1883-1894.
- Dela Pierre F., Lozar F. & Polino R. (1997) - *L'utilizzo della tettonostratigrafia per la rappresentazione cartografica delle successioni metasedimentarie nelle aree di catena*. Mem. Sci. Geol., **49**, 195-206.
- Dela Pierre F., Polino R., Borghi A., Carraro F., Fioraso G. & Giardino M. (1999) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 132-152-153 "Bardonecchia"*. Servizio Geologico d'Italia, 118 pp.
- Elter G. & Elter P. (1965) - *Carta geologica della regione del Piccolo S. Bernardo (versante italiano)*. Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova, **25**.
- Fioraso G. (1994) - *Ricostruzione dell'evoluzione quaternaria del versante destro della media Valle di Susa nel tratto compreso tra Exilles e Graverè*. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino, Tesi di Laurea inedita, 125 pp.
- Ford T.D. & Pedley H.M. (1996) - *A review of tufa and travertine deposits of the world*. Earth-Science Review, **41**, 117-175.
- Giardino M. & Polino R. (1997) - *Le deformazioni di versante nell'alta Valle di Susa: risposta pellicolare dell'evoluzione tettonica recente*. Il Quaternario, **10**(2), 293-298.
- Giardino M. & Fioraso G. (1998) - *Cartografia geologica delle formazioni superficiali in area di catena montuosa: il rilevamento del Foglio "Bardonecchia" nell'ambito del Progetto CARG*. Mem. Sci. Geol., **50**, 133-153.
- Josa S. (1999) - *Studio geologico del fenomeno gravitativo di Sauze d'Oulx (Valle di Susa - Provincia di Torino)*. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino, Tesi di Laurea inedita, 82 pp.
- Mortara G. & Sorzana P.F. (1987) - *Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell'arco alpino occidentale italiano. Considerazioni lito-strutturali e morfologiche*. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 303-314.
- Paro L. (1997) - *Ricostruzione dell'evoluzione geologica quaternaria del versante destro della Valle di Susa nel tratto compreso tra Salbertrand ed Exilles*. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino, Tesi di Laurea inedita, 135 pp.

- Pedley H.M. (1990) - *Classification and environmental models of cool freshwater tufas*. *Sedimentary Geology*, **68**, 143-154.
- Radbruch-Hall D.H. (1978) - *Gravitation creep of rock masses on slopes*. In: B. Voight (Ed.), *Rockslide and avalanches*, 1, *Developments in Geotechnical Engineering*, 14A, Elsevier, 607-657.
- Servizio Geologico d'Italia (1911) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio 54 "Oulx"*.
- Servizio Geologico d'Italia (1999) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 132-152-153 "Bardonecchia"*.

Squinabol S. (1888) - *Il travertino fra Aosta e il Piccolo S. Bernardo*. Genova, 7 pp.

Ms. ricevuto il 26 aprile 2000  
Testo definitivo ricevuto il 17 maggio 2000

Ms. received: April 26, 2000  
Final text received: May 17, 2000