

L. PICCINI (*), G. PRANZINI (**)

IDROGEOLOGIA E CARISMO DEL BACINO DEL FIUME FRIGIDO (ALPI APUANE) (***)

Riassunto — Il bacino del Fiume Frigido, nelle Alpi Apuane, è stato studiato in dettaglio con lo scopo principale di ricostruirne i limiti idrogeologici.

L'acquifero carsico principale è costituito dalla successione Grezzoni-Marmi e, localmente, dai Calcari Selciferi.

Esso è delimitato in basso dalle rocce praticamente impermeabili (filladi e porfiroidi) del basamento paleozoico ed in alto da rocce a permeabilità bassa o medio-bassa (diaspri, calcescisti, scisti sericitici) delle formazioni giurassiche e cretacee dell'Unità Apuana metamorfica.

Le complesse strutture delle Apuane interferiscono con la morfologia, caratterizzata da una alta energia del rilievo, per dividere l'acquifero carsico in più unità idrogeologiche, drenate da poche sorgenti di grande portata.

La distribuzione e la portata delle sorgenti, sia all'interno che all'esterno del bacino del Frigido, indicano che parte delle acque che si infiltrano nel versante garfagnino delle Apuane alimentano le sorgenti del Frigido. Questo prevalente deflusso delle acque sotterranee da NE a SW ha la principale spiegazione nel fatto che le valli del versante marino sono incise più profondamente di quelle del versante garfagnino: il livello di base delle acque carsiche è fra 200 e 300 metri di quota nel bacino del Frigido e oltre 500 nelle vallate garfagnine.

Questo schema idrogeologico è in accordo con la tipologia delle cavità carsiche: il versante NE è caratterizzato da cavità a prevalente sviluppo verticale, distribuite su superfici anche poco acclivi, il che ne fa un'area di assorbimento; nel versante opposto, più acclive, le grotte hanno anche gallerie quasi orizzontali, che testimoniano la loro funzione di risorgive.

Sulla base delle strutture geologiche, della distribuzione e portata delle sorgenti e di prove di colorazione, sono stati tracciati i limiti del bacino idrogeologico del Frigido. Questo risulta ampliato di 26,2 km² rispetto ai 46,7 del bacino idrografico sotteso dalla stazione idrometrica di Canevara.

Nel bilancio idrologico redatto per il bacino idrogeologico risulta però che il deflusso medio calcolato è inferiore di 1,69 m³/s rispetto a quello misurato dall'Ufficio Idrografico e riportato negli Annali Idrologici. Questa differenza è stata imputata

(*) Federazione Speleologica Toscana.

(**) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze.

(***) Pubblicazione con i contributi MPI 40% per la ricerca «Le risorse idriche di sottosuolo della Toscana». Responsabile G. Pranzini.

alla imprecisione con cui venivano misurate le portate di piena, imprecisione dovuta alla mancanza di adeguate attrezzature.

Abstract — *Hydrogeology and karst of the Frigido River Basin (Apuane Alps)*. The Frigido River Basin, in the Apuane Alps, has been studied in detail in order to determine its hydrogeologic boundaries. This study was undertaken because, according to the data of the Annali Idrologici, the run-off coefficient of the Frigido Basin is so high (1.92) as to require a catchment area at least twice the size of its hydrographic basin.

The main karstic aquifer is formed by the Grezzoni - Marmi succession, and, locally, the Calcari Selciferi. It is bordered below by the virtually impermeable rocks of the Paleozoic basement (phyllites and porphyrites), and above by the poorly permeable to somewhat permeable rocks (cherts, calc-schists, and sericitic schists) of the Jurassic and Cretaceous formations of the metamorphic Unità Apuana.

The complex structures of the Apuane interact with the extremely rugged morphology of the area to divide the karstic aquifer into several hydrogeologic units drained by a small number of springs with high flow rates.

The distribution and the flow rates of the springs, both within and outside the Frigido Basin, indicates that some of the water infiltrating on the Garfagnana side of the Apuane supplies the springs of the Frigido. The reason behind the general N.W.-S.E. flow of the subterranean waters is that the valleys of the sea-ward facing slopes are more deeply incised than those facing Garfagnana. The base level of the karstic waters is at an elevation between 200 and 300 metres in the Frigido basin and over 400 metres in the valleys of Garfagnana.

This hydrogeologic interpretation agrees with the typology of the karstic caverns. The north-eastern flank is characterized by vertical caves, even on gently sloping surfaces, making it an area of absorption. On the steeper, south-western flank, the caves also have nearly horizontal passageways, which shows that they act as springs.

The limits of the Frigido hydrogeologic basin were determined on the basis of: a) the distribution of rocks rendered permeable by fractures and karstism; b) the geologic structures; c) the flow rates of the springs, both within and outside of the catchment basin; d) the results of dye tests.

The catchment basin size turns out to be 26.2 km² larger than the 46.7 km² area of the hydrographic basin.

The extent of the hypothesized basin was then tested using the hydrologic balance.

Since the average elevation of the pluviometers set out in the basin is lower than its average elevation, the value of 2270 mm calculated by the Hydrographic Office using isohyets was corrected to 2644 mm, with a method that takes the increase in rainfall with increasing elevation into account.

It has been calculated that water infiltrating from the surrounding areas enters the Frigido basin at the rate of 1.71 m³/sec. This agrees well with the flow rates of the Frigido springs.

It turns out, however, that the calculated drainage rate for the true basin is 1.69 m³/s less than that measured by the Ufficio Idrografico and printed in the Annali Idrologici. This discrepancy has been attributed to the imprecision, caused by the lack of adequate equipment, with which flood discharges were measured.

Key words — Hydrogeology - Karst - Springs - Hydrologic balance - Apuane Alps.

1 — PREMESSA

Secondo i dati pubblicati negli Annali dell'Ufficio Idrografico dell'Arno, il Fiume Frigido avrebbe un coefficiente di deflusso uguale a 1,91. In altre parole il fiume porterebbe quasi il doppio dell'acqua che cade nel suo bacino imbrifero. Questo semplice dato numerico è rimasto tale per molti anni, durante i quali il bacino del Frigido è stato portato come chiaro esempio di bacino idrogeologico più ampio di quello idrografico, senza che, tuttavia, nessuno andasse a verificare l'effettiva estensione del bacino idrogeologico.

PERRONE prima (1912) e MASINI poi (1958 e 1960) avevano cercato una spiegazione del fenomeno nel diffuso carsismo delle Apuane e nella portata straordinariamente alta della sorgente di Forno, della quale eseguirono anche misure di portata, senza però cercare di definire la sua area di alimentazione.

Ci è quindi sembrato interessante andare a vedere più in dettaglio la situazione idrogeologica dell'area; anche perché da qualche tempo, presso il nostro Dipartimento, sono in corso studi sull'idrogeologica carsica della Toscana, finalizzati alla valutazione delle risorse idriche di sottosuolo, nonché, in collaborazione con ricercatori dell'Università di Bologna, uno studio sul rischio di inquinamento delle sorgenti carsiche delle Apuane, nell'ambito della ricerca C.N.R. sulla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi.

2 — INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO

Il bacino del Fiume Frigido si trova nella parte centrale del versante tirrenico delle Alpi Apuane ed è separato dalla Garfagnana dalla dorsale principale della catena, in cui spiccano i rilievi del M. Sagro (1749 m), del M. Grondilice (1805 m), del M. Contrario (1790 m), del M. Tambura (1885 m) e del M. Sella (1730 m).

Il bacino, il cui orientamento è NE-SW, perpendicolare, cioè, all'asse della catena, ha una estensione di circa 60 km² alla foce e confina ad Ovest con quello del Carrione, a NW con i sottobacini del Lucido di Vinca e del Solco di Equi, a NE con il bacino del Serchio di Gramolazzo, a Est con il bacino della Turrite Secca, a SE con il sottobacino del Torrente Serra e a Sud con il bacino del Canale di Montignoso.

Due dorsali secondarie, una orientata N-S da M. Cavallo a M. Girello e l'altra E-W da M. Altissimo a M. Antona, individuano i

tre sottobacini del Canale Secco, del Torrente Renara e del Fosso Antona, la cui caratteristica comune è di essere privi di scorrimento superficiale per gran parte della loro estensione, ricevendo la quasi totalità delle acque da grosse sorgenti solo nei loro tratti finali. In pratica, lo scorrimento superficiale è limitato, salvo nei periodi a forte piovosità, alle aree di affioramento delle rocce impermeabili, in particolare il basamento paleozoico.

Da un punto di vista morfologico la vallata del Frigido ha un aspetto tipicamente alpino, circondata com'è da una imponente corona di cime montuose che, pur non essendo molto elevate in assoluto, lo sono però rispetto al fondovalle, con dislivelli di oltre 1500 metri.

Tale morfologia è dovuta sia alla tettonica, che ha causato un notevole sollevamento in tempi relativamente recenti, che alla litologia. La natura prevalentemente carbonatica delle cime montuose ha conferito loro un aspetto quasi dolomitico, con creste affilate, pareti verticali e torrioni isolati, mentre i solchi vallivi sono profondamente incassati e localmente con morfologia a canyon.

Per contro i rilievi costituiti dalle rocce filladiche del basamento hanno morfologie arrotondate e valli meno incise; sono inoltre caratterizzati da una fitta copertura boschiva, il che li pone in netto contrasto con i rilievi calcarei, che sono in massima parte spogli e con le rocce affioranti.

Il glacialismo quaternario ha lasciato evidenti forme, sia di erosione che di accumulo, soprattutto nel versante nordorientale delle Apuane. Anche sul versante marino sono però presenti superfici di modellamento glaciale, preservate dall'erosione per effetto delle diffuse cavità carsiche di assorbimento (BRASCHI *et al.*, 1986).

Un discorso più ampio meritano le morfologie carsiche, particolarmente abbondanti in questa area (FEDERICI *et al.*, 1981).

I Marmi della serie apuana, a causa dell'alto tenore di CaCO_3 , sono le rocce in cui i fenomeni carsici hanno avuto il maggiore sviluppo; seguono, in ordine, i Grezzoni, i Calcari Selciferi ed i Calcari Selciferi a Entrochi. Ma forme carsiche superficiali si trovano localmente anche nei Cipollini (ad esempio sul versante Nord del M. Fiocca e ad Est del M. Freddone).

Sul fianco nord-orientale della catena apuana si trovano ampie zone a bassa pendenza, nelle quali le forme carsiche superficiali, doline, pozzi a neve o di erosione inversa, campi solcati, hanno avuto possibilità di formarsi e causano un elevato assorbimento delle acque meteoriche. La genesi di queste aree, tra cui vale la pena di

ricordare la Carcaraia per la ricchezza di pozzi, è legata anche all'azione dei ghiacciai.

Nel versante sud-occidentale, la generale maggiore acclività delle aree di affioramento delle rocce carbonatiche ha fatto sì che le forme tipiche dei paesaggi carsici siano molto rare. Più comuni sono invece le microforme dovute al ruscellamento superficiale.

Da un punto di vista idrologico il maggiore o minore sviluppo delle forme carsiche superficiali condiziona in modo determinante l'entità del ruscellamento. Vi sono zone delle Apuane in cui l'acqua di precipitazione viene assorbita quasi per intero, anche a causa della scarsa copertura vegetale. In certe aree, come la Carcaraia, è probabile che l'infiltrazione raggiunga il 90% delle precipitazioni.

Per riassumere i caratteri morfologici essenziali dei due versanti delle Alpi Apuane, si può dire che: il fianco NE ha una acclività minore e forme carsiche ben sviluppate, caratteristiche che ne fanno una zona di prevalente assorbimento; il fianco SW ha un'acclività maggiore, con poche aree di assorbimento, e funge prevalentemente da area di drenaggio, anche a causa della maggiore incisione delle valli verso mare rispetto a quelle garfagnine.

Anche i fenomeni carsici profondi rispecchiano questa situazione, tant'è che sul versante nord-orientale prevalgono le grotte a sviluppo verticale mentre in quello sud-occidentale ci sono soprattutto grotte ad andamento orizzontale.

In base ai dati riportati sul Catasto Regionale delle Cavità Naturali della Toscana (GIANNOTTI, LANZA e MARCUCCI, 1954; DE SIO e CHIANCONE, 1965; GIANNOTTI e PRELOVSEK, 1978), nel bacino del Frigido si conoscono 70 grotte, cioè poco meno del 10% di tutte quelle catalogate in Toscana sino al 1986. Se poi consideriamo le numerose grotte esterne al bacino, ma idrogeologicamente correlate con esso, il numero sale a circa 160. E quasi altrettante sono le grotte conosciute, ma non ancora catastate.

3 — GEOLOGIA

Le Alpi Apuane costituiscono un elemento unico nel panorama geologico italiano. La complessità della situazione strutturale, unita alla grande varietà di formazioni geologiche, ne ha fatto una palestra per più generazioni di geologi, italiani e stranieri, sia strutturalisti che stratigrafi.

Non è certamente il caso di ripercorrere qui tutta la storia degli

studi eseguiti e delle interpretazioni succedutesi. Tuttavia, considerato che la stratigrafia delle Apuane costituisce un elemento fondamentale per individuare le unità idrogeologiche, mentre l'assetto strutturale incide profondamente sulla circolazione idrica di sottosuolo, riteniamo necessario, per lo scopo dello studio, una breve descrizione delle serie stratigrafiche e dei maggiori motivi strutturali.

Le serie qui descritte sono state riprese dalla «Carta Geologico-Strutturale del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane» (CARMIGNANI, 1984), la cui stesura è stata diretta e coordinata da L. Carmignani, dell'Università di Pisa. La stessa Carta è stata utilizzata, semplificandola notevolmente, come documento di base per la redazione della Carta Idrogeologica (Tav.1). Purtroppo è attualmente pubblicato solo il Foglio Nord, cosicché per la fascia inferiore sono stati utilizzati rilievi diversi, con un dettaglio diverso, alcuni dei quali basati su interpretazioni superate della geologia apuana.

In particolare, per la zona del Monte Corchia è stato utilizzato il rilievo di CARMIGNANI e GIGLIA (1983); per la zona del Monte Altissimo, il rilievo di Giglia e Paiotti (GIGLIA, 1967); per l'area intorno a Massa, la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000.

3.1 — *Stratigrafia.*

Diamo qui una breve descrizione delle formazioni affioranti nell'area studiata, riservando maggiore spazio a quelle interessate da fenomeni carsici. Per maggiori dettagli rimandiamo agli studi di carattere stratigrafico, in particolare NARDI (1963, 1967), BOCCALETTI e BORTOLOTTI (1965), DALLAN e NARDI (1975), BORTOLOTTI *et al.* (1970).

Le rocce affioranti nell'area del bacino del Frigido rientrano per lo più nel Complesso Metamorfico Apuano, ad esclusione della fascia sud-occidentale dove affiorano i termini dell'Unità di Massa, anch'essi metamorfici.

Questi due complessi corrispondono a due unità tettoniche cui competono due serie stratigrafiche distinte, anche se simili in molti termini.

L'intensa tettonizzazione che ha interessato il nucleo apuano ha da sempre posto non pochi problemi per la ricostruzione delle due serie. A ciò si aggiunga l'azione del metamorfismo che, cancellando in molte formazioni ogni resto fossile, ha reso problematiche le correlazioni stratigrafiche. Così ancora oggi sopravvivono dubbi riguardo la posizione stratigrafica di alcune formazioni.

Geometricamente sovrapposta a queste due unità si trova la Falda Toscana, la cui serie stratigrafica ricalca in molti termini quella dell'Unità Apuana, senza presentare, però, fenomeni di metamorfismo.

Principali formazioni metamorfiche dell'Unità Apuana

Costituiscono una serie di tipo alpino, di età compresa fra l'Ordoviciano (forse anche il Cambriano) e l'Oligocene Superiore, caratterizzata da più eventi metamorfici tardo-terziari (orogenesi Alpina) a facies di epizona (scisti verdi).

Nell'area studiata affiorano tutti i termini della serie.

Filladi Inferiori (Ordoviciano, forse anche Cambriano).

Filladi quarzítico-muscovitiche talora cloritiche, alternanti a strati a composizione prevalentemente quarzítica (e talora anche albitica). Presenti anche livelli di filladi con grafite. Lo spessore totale è ignoto non affiorando la base della formazione.

Porfiroidi e Scisti Porfirici (Ordoviciano?).

Rocce massicce, metamorfiche, di origine vulcanica, a composizione prevalentemente riolitica, con rari fenocristalli (porfiroidi). Superiormente passano a filladi a muscovite e clorite, con abbondanti porfiroclasti di quarzo (scisti porfirici), derivate per metamorfismo da rocce arcosiche, prodotte a loro volta dal disfacimento di rocce acide preesistenti. Lo spessore varia da pochi metri ad almeno 300 metri.

Quarziti (Ordoviciano Superiore?)

Quarziti, talora filladiche, e metareniti arcosiche, alternate a filladi e filladi quarzítiche. Spessore: poche decine di metri.

Dolomie scistose a Orthoceras (Siluriano)

Dolomie grigie cristalline, con resti di Crinoidi e Orthoceras. Si trovano in lenti spesse pochi metri al tetto dei Porfiroidi.

Verrucano s.s. (Ladinico Sup. - Carnico)

Quarziti con filladi e metaconglomerati quarzosi a matrice quarzítico-filladica. Spessore: pochi metri.

Formazione di Vinca (Carnico - Norico)

Quarziti e arenarie feldspatiche metamorfiche, a grana variabile, con intercalazioni di filladi quarzítico-muscovitiche e talora di dolomie. Spessore da qualche metro a circa 30.

Grezzoni (Norico-Retico).

Dolomie e calcari dolomitici a stratificazione grossolana, più o meno ricristallizzati, di colore grigio chiaro o rosato. La parte inferiore è generalmente costituita da brecce dolomitiche, mentre nella parte superiore la stratificazione si fa più evidente e compaiono filladi cloritiche lungo i giunti di strato. Al tetto passano in qualche punto a marmi saccaroidi con molluschi e brachiopodi (Marmi a Megalodonti). Lo spessore va da poche decine di metri fino agli oltre 400 del Monte Grondilice.

Marmi a Megalodonti (Retico)

Marmi saccaroidi, massicci o poco stratificati, con scarsa clorite e muscovite lungo i giunti di strato. Spessore massimo: un centinaio di metri.

Brecce di Seravezza e Scisti a Cloritoide (Retico - Lias Inferiore)

Brecce ad elementi marmorei e dolomitici immersi in un cemento scistoso-arenaceo con cloritoide; filladi a cloritoide. Spessore massimo di circa 30 metri.

Marmi dolomitici e Dolomie Cristalline (Lias Inferiore)

Marmi più o meno dolomitici alternati a strati di dolomie, che passano ai Marmi s.s. per progressiva diminuzione dei livelli dolomitici. Spessore massimo non inferiore a 400 m.

Marmi s.s. (Lias Inf.-Medio?)

Marmi saccaroidi, di colore bianco o grigio chiaro, che localmente includono brecce ad elementi marmorei e, più raramente, di selce e filladi. Spessore assai variabile: da pochi metri, nelle strutture più strizzate, fino ad oltre 400.

Calcari Selciferi (Lias Medio - Superiore)

Calcari grigi metamorfosati, ben stratificati, con liste e noduli di selce, trasformata in quarzite bianca, e rari livelli calcarenitici. Sono frequenti strati di calcescisti e di filladi carbonatiche con tracce di pirite e rare ammoniti piritizzate. Lo spessore, molto variabile, può raggiungere i 150 metri.

Calcescisti (Lias Sup. - Dogger)

Calcescisti con intercalazioni di filladi carbonatiche. Spessore di poche decine di metri.

Diaspri (Malm)

Radiolariti metamorfosate, sottilmente stratificate, con interca-

lazioni di filladi quarzitiche e talora, al tetto della formazione, di filladi calcareo-silicee. Lo spessore arriva a 100 m circa.

Calcarei Selciferi a Entrochi (Titonico - Creta Inf.)

Calcarei con liste e noduli di selce, ben stratificati, metamorfici. Verso il tetto presentano potenti strati calcarenitici. Spessore da una decina di metri sino a 200 circa.

Scisti Sericitici (Creta Inf. - Oligocene)

Formazione eterogenea, costituita prevalentemente da filladi a muscovite, con filladi carbonatiche, marmi cloritici e radiolariti. Spessore da pochi metri ad oltre 100.

Cipollini (Creta Inf. - Oligocene)

Calcescisti più o meno calcarei, talora cloritici, spesso in fitta alternanza con filladi carbonatiche o muscovitiche. Sono in parziale eteropia con gli Scisti Sericitici. Lo spessore va da qualche metro ad oltre 150.

Calcarei a Nummuliti (Oligocene)

Calcareniti metamorfosate con resti di Orbitoidi, Nummuliti e Assiline. Lo spessore è generalmente di pochi metri.

Pseudomacigno (Oligocene Superiore)

Arenarie quarzoso-feldspatiche micacee, metamorfosate, alternate a filladi quarzitiche. Lo spessore è di 100-150 metri, ma ne manca il tetto.

Formazioni metamorfiche dell'Unità di Massa

Costituiscono una serie di tipo alpino, di età compresa fra l'Ordoviciano e il Carnico, caratterizzata da un metamorfismo di età alpina a facies epizonali (scisti verdi).

Filladi del basamento paleozoico (Cambriano? - Ordoviciano)

Sono in tutto simili a quelle dell'Unità Apuana. Lo spessore complessivo non si conosce.

Filladi inferiori della copertura triassica (Anisico?)

Filladi muscovitiche o muscovitico-quarzitiche, spesso grafitiche, localmente con metarenarie. Spessore massimo di circa 50 metri.

Marmi a Crinoidi (Anisico Sup.? - Ladinico)

Marmi bianchi o grigi, talvolta con muscovite, e rari livelli dolomitici. Affiorano in lenti spesse fino a 100 m.

Brecce Marmoree (Ladinico)

Brecce monogeniche ad elementi marmorei e matrice filladica, in lenti di spessore sino a circa 100 m.

Prasiniti (Ladinico)

Metabasiti ad albite, clorite, epidoto e quarzo, talvolta con livelli di filladi e metaconglomerati. Spessore di pochi metri.

Filladi superiori e Anageniti (Carnico)

Filladi quarzítico-muscovitiche, più o meno cloritiche, in eteropia con conglomerati quarzosi a matrice filladica. Affiorano per circa 150 m di spessore.

Formazioni della Falda Toscana

Calcarea Cavernoso (Norico) e Brecce Poligeniche (Miocene, almeno per quelle per cui è stata riconosciuta la natura sedimentaria).

Calcari dolomitici e dolomie grigie con struttura tipica a cellette. Brecce poligeniche con elementi prevalentemente dolomitici e calcareao-dolomitici provenienti dalle formazioni triassiche della Falda Toscana e, in minor misura, dalle altre formazioni, comprese quelle delle unità metamorfiche. Spessore massimo: 300-400 m.

Calcari e Marne a Rhaetavicula contorta Auct. (Formazione di La Spezia) (Retico)

Calcari più o meno dolomitici con intercalazioni di marne. Spessore: circa 100 m.

Calcarea Massiccio (Lias Inferiore)

Calcari e calcari dolomitici a stratificazione grossolana o assente. Spessore: 200-300 m.

Calcari ad Angulati Auct. (Formazione di Ferriera) (Lias Inferiore)

Calcari marmosi, alternati a marne siltose e argilliti. Spessore: 200-300 m.

Rosso Ammonitico (Lias Inf. - Medio)

Calcari nodulari, talora con interstrati marnosi. Spessore: 5-30 m.

Scaglia Toscana s.l. (Creta Inf. - Oligocene)

Argilliti e marne, talora in alternanza con livelli calcarenitici e calciruditici. Spessore: 100-200 metri.

Macigno (Oligocene Sup. - Miocene Inf.)

Arenarie quarzoso-feldspatiche-micacee in strati di potenza variabile, con livelli più sottili di siltiti argillose. Spessore: oltre 1000 metri.

Depositi quaternari

Depositi alluvionali antichi (dintorni di Minucciano)

Conglomerati grossolani a elementi di Macigno, in genere in facies di conoide.

Morene

Depositi glaciali o fluvio-glaciali, spesso organizzati in cordoni allungati, a granulometria assai varia. Sono attribuiti alla glaciazione wurmiana.

Depositi fluviali cementati (Vallone di Colonnata)

Depositi alluvionali con tracce di terrazzamento.

Alluvioni

Depositi alluvionali fluviali e fluvio-lacustri, spesso grossolani, recenti ed attuali, localmente terrazzati.

Detriti

Vi sono compresi i detriti di falda, talora cementati, e gli accumuli eluviali e colluviali di maggiore spessore.

Nella Tav. 1 non sono stati riportati i «ravaneti» (scarti e detriti delle cave di marmo), localmente anche molto estesi.

3.2 — *Tettonica*

Le Alpi Apuane rappresentano una finestra tettonica dove affiorano le formazioni metamorfiche di una serie simile a quella della Falda Toscana.

Tra l'Unità Apuana e la Falda Toscana non metamorfica si trovano interposte alcune scaglie tettoniche, anch'esse metamorfiche, con stratigrafia simile, ma in genere limitata ai termini inferiori.

Fino a qualche anno fa si dava alla serie metamorfica apuana l'appellativo di «autoctono», giustificandolo con la posizione geometrica in finestra tettonica e, soprattutto, con il fatto che nelle strut-

ture fosse implicato il basamento costituito dalle filladi erciniche. I recenti studi strutturali hanno dimostrato che le Apuane sono formate da una serie di pieghe isoclinali appilate l'una all'altra, con movimenti orizzontali di molti chilometri e quindi con caratteristiche di piccole falde di sovrascorrimento (*fold nappes*). Per queste ed altre ragioni oggi si è abbandonato l'appellativo di autoctono, preferendo denominazioni più generiche come Complesso Metamorfico Apuano o Tuscanide I (CARMIGNANI e GIGLIA, 1984).

Le Apuane rappresentano una unità tettonico-strutturale a deformazione polifasica e dalla storia evolutiva molto complessa.

Il gruppo di ricerca coordinato da M. Boccaletti (BOCCALETTI e GOSSO, 1980; BOCCALETTI *et al.*, 1983; CAPITANI e SANI, 1983) riconosce almeno tre fasi deformative sin-metamorfiche. La prima e più antica avrebbe dato origine a pieghe isoclinali, con cerniere sradicate e fianchi laminati, i cui piani assiali sono paralleli alla stratificazione e la relativa scistosità coincide con il *layering* litologico.

La seconda fase è invece caratterizzata da pieghe a fianchi stretti ma non paralleli, quasi mai sradicate. È a questa fase che vengono ricondotte le strutture a grande scala. I piani assiali hanno immersione pressoché costante verso Ovest, solo parzialmente modificata dalla terza fase.

La terza ed ultima fase, che è ritenuta contemporanea al sollevamento del massiccio apuano, è la più blanda delle tre. A scala media ha dato origine a pieghe simmetriche, aperte, cui è associata una debole scistosità di piano assiale.

Non molto diversa è l'ipotesi di L. CARMIGNANI, G. GIGLIA e R. KLIGFIELD presentata in più lavori (CARMIGNANI e GIGLIA, 1979 e 1984); CARMIGNANI *et al.*, 1980). Essi riconoscono due sole fasi deformative principali: una prima fase, a carattere traspositivo, responsabile delle strutture maggiori, a geometria isoclinalica, che viene interpretata come sviluppatasi in una fascia di taglio ensialico; una seconda fase, più blanda, che avrebbe provocato il sollevamento dell'intero massiccio in una mega antiforme, cui sono associate pieghe parassite a tutte le scale. Il sollevamento delle Apuane in cupola antiforme sarebbe la causa dello scaricamento gravitativo della sovrapposta Falda Toscana. Una fase intermedia, tra le due a scala regionale, sarebbe localizzata in una fascia trasversale tra la zona di Arni e la valle del Frigido.

Le analisi radiometriche, compiute soprattutto da R. Kligfield (KLIGFIELD *et al.*, 1982) indicano l'esistenza di almeno tre eventi metamorfici, datati rispettivamente a 26, 14 e 11 milioni di anni.

La prima età viene assegnata alla fase deformativa più intensa, che sarebbe coeva al sovrascorrimento della Falda Toscana e, di conseguenza, alla fine della deposizione della serie apuana. La seconda fase avrebbe prodotto effetti solo nella fascia localizzata di cui si è detto sopra. La terza corrisponderebbe al sollevamento massiccio delle Apuane, che avrebbe rimesso in movimento la Falda Toscana.

In generale, dunque, il nucleo apuano rappresenta un'area a deformazione prevalentemente duttile, dove la tettonica disgiuntiva è praticamente assente, se non a piccola scala. Molto comuni sono le superfici litologiche che in passato venivano considerate faglie, per lo più inverse; trattandosi però di superfici tettoniche simetamorfiche, sviluppatasi in un ambiente deformativo di tipo duttile, oggi si preferisce non considerarle più come tali.

Le uniche vere faglie si trovano ai margini del massiccio, nella zona di contatto della Falda Toscana, e sono legate al recente sollevamento in blocco del nucleo apuano. Esse sono più frequenti sul lato Nord-Est e le maggiori, correlabili con la formazione del graben del Serchio, sono orientate NW-SE.

La Falda Toscana è invece caratterizzata da una tettonica più chiaramente di tipo disgiuntivo e, tutto sommato, di più facile comprensione. Non essendo però questa in diretto rapporto con l'idrogeologia del Frigido si è preferito non entrare nel merito della sua storia tettonica e dei problemi connessi con il sovrascorrimento sulle unità apuane.

Nel bacino del Frigido e nelle aree contigue studiate, la sovrapposizione di fasi deformative diverse, anche con diversa direzione degli stress principali, ha dato origine a strutture molto complesse, difficili da interpretare anche da parte di chi ha maggior dimestichezza degli scriventi con i problemi strutturali.

Limitandosi ai motivi strutturali principali, sono riconoscibili alcune pieghe maggiori, a scala chilometrica (sinclinale di Carrara anticlinale di Vinca, sinclinale di Orto di Donna, anticlinale del M. Tambura), cui si associano almeno una decina di strutture minori, spesso costituite da pieghe sradicate con vergenza ad Est (Tav. 1).

Le sezioni della Tav. 1, tagliate ortogonalmente agli assi delle pieghe principali, riportano solo, anche per ragioni grafiche, le strutture plicative di scala maggiore. Poiché, ai fini del modello idrogeologico, era importante mostrare la probabile continuità o meno delle rocce permeabili e di quelle che possono costituire delle barriere per la circolazione idrica, le strutture plicative sono state estrapolate nel sottosuolo forse anche al di là del lecito. I maggiori dubbi

riguardano la continuità delle strette cerniere dove si trovano le filladi del basamento: è possibile che queste siano in alcuni punti laminate fino a sparire, consentendo quindi il passaggio delle acque sotterranee.

4 — PERMEABILITÀ DELLE ROCCE E SCHEMA IDROGEOLOGICO

Poiché lo scopo principale di questo studio era quello di individuare i limiti del bacino idrogeologico del Frigido, la definizione del grado di permeabilità delle varie formazioni geologiche è di fondamentale importanza.

Una valutazione di permeabilità non poteva che derivare da una attenta analisi delle caratteristiche litologiche delle singole unità, dal loro grado di fratturazione e, dove presente, dal livello di carsificazione raggiunto. Altre indicazioni, anche di tipo quantitativo, sono state fornite dalla distribuzione e dalla portata delle sorgenti nelle formazioni geologiche o al contatto fra formazioni diverse (CAZZANTE, 1987).

Su questa base tutte le formazioni geologiche a permeabilità prevalentemente secondaria sono state raggruppate in quattro classi di permeabilità, trascurando per semplicità le formazioni di minor importanza.

In particolare le Dolomie Scistose ad Orthoceras e le Quarziti paleozoiche sono state accorpate con i Porfiroidi, il Verrucano con la Formazione di Vinca, i Marmi a Megalodonti non sono stati distinti dai Grezzoni e così pure non si è fatta distinzione tra Marmi Dolomitici e Marmi s.s..

Per l'Unità di Massa si sono trascurate le Filladi inferiori della copertura triassica e le esili lenti di Prasiniti.

Tra parentesi si sono riportate le sigle da noi usate nella Carta Idrogeologica con gli accorpamenti suddetti.

1ª classe: Rocce ad alta permeabilità per fessurazione e carsismo.

Grezzoni (gr) e Marmi (m), dell'Unità Apuana. Calcare Cavernoso e Breccie Poligeniche (cv) e Calcare Massiccio (cm), della Falda Toscana.

2ª classe: Rocce a media permeabilità per fessurazione e limitate cavità carsiche.

Calcarei Selciferi (cs), Calcescisti (csc) e Calcari Selciferi ad Entrochi (csE), dell'Unità Apuana. Marmi a Crinoidi (mC) dell'Unità di

Massa. Calcari e Marne a Rhaetavicula contorta (cR) e Calcari ad Angulati (cA), della Falda Toscana.

3ª classe: Rocce a bassa permeabilità per fratturazione.

Formazione di Vinca (fV), Brecce di Seravezza (br), Diaspri (d), Cipollini (cp), Calcari a Nummuliti (scN) e Pseudomacigno (pmg), dell'Unità Apuana. Brecce marmoree (brm) dell'Unità di Massa. Rosso Ammonitico (crA) e Macigno (mg), della Falda Toscana.

4ª classe: Rocce praticamente impermeabili.

Filladi Inferiori (fl), Porfiroidi e Scisti Porfirici (pf) e Scisti Sericitici (sc), dell'Unità Apuana. Filladi Inferiori (fl') e Filladi Superiori (fs) dell'Unità di Massa. Scaglia Toscana (st) della Falda Toscana.

Alla prima classe sono state attribuite le formazioni composte da rocce altamente carsificate. La composizione dolomitica dei Grezzoni li rende un pò meno solubili dei Marmi, calcari quasi puri. La minore solubilità dei Grezzoni è però compensata dalla maggiore fratturazione, cosicché il carsismo di sottosuolo risulta ben sviluppato in entrambe le formazioni. Considerazioni analoghe si possono fare anche per Calcare Massiccio e Calcare Cavernoso.

Nella seconda classe abbiamo rocce meno carsificabili, rispetto a quelle della prima, o per la componente silicea dei calcari (Calcari Selciferi e Calcari Selciferi ad Entrochi) o per la presenza di interstrati filladici (Calcescisti) o argillosi (Calcari a Rhaetavicula, Calcari ad Angulati).

Tuttavia l'elevato grado di fratturazione e la presenza di cavità di dissoluzione, sia pure di dimensioni piccole, fanno sì che le rocce siano nel complesso discretamente permeabili.

Alla terza classe sono state assegnate rocce con carsismo assente o limitato a pochissimi fenomeni superficiali, nelle quali tuttavia la fratturazione, sempre presente anche se con diverso grado, consente una circolazione idrica di modesta entità.

In realtà questa classe è piuttosto eterogenea per quanto riguarda la litologia e le modalità della circolazione idrica: si va da unità prevalentemente arenacee (Pseudomacigno e Macigno), nelle quali gli strati siltitici ed argillitici di maggiore spessore determinano l'emergenza delle acque sotterranee, ai diaspri, la cui intensa e minuta fratturazione non dà origine ad una buona permeabilità a causa del contenuto argilloso delle radiolariti.

La quarta classe raggruppa le rocce a permeabilità bassissima nelle quali è però possibile una lenta circolazione idrica in genere localizzata nelle zone a più alto indice di fratturazione. Lo studio

della distribuzione e della portata delle sorgenti delle Apuane (CAZZANTE, 1987) ha messo in luce che nelle Filladi ci sono numerose sorgenti, sia pure di bassa portata; in pratica però si è visto che la maggior parte di queste traggono alimentazione dalla coltre detritica, assai più diffusa di quanto appare nella Carta Idrogeologica (Tav. 1) e nella stessa Carta Geologica di CARMIGNANI (1984).

Ai fini del presente studio, che si occupa essenzialmente della circolazione idrica carsica, le rocce della quarta classe possono essere considerate praticamente impermeabili.

Una quinta classe comprende i depositi recenti di origine gravitativa (detriti), glaciale (morene) e fluviale (alluvioni), la cui permeabilità è legata alla porosità primaria.

Questa classe non corrisponde ad un grado determinato di permeabilità; essa comprende anzi terreni a permeabilità molto diversa, da quella molto alta dei detriti di elementi calcarei a quella bassissima delle alluvioni argillose. Dato che la permeabilità di queste rocce aveva scarsa importanza per lo studio idrogeologico del bacino del Frigido, non si è ritenuto necessario fare distinzioni che avrebbero complicato (e, soprattutto, reso più costosa) la Carta Idrogeologica. Le sigle delle singole unità geologiche servono comunque per la loro distinzione.

La Carta Idrogeologica (Tav. 1), con la distribuzione delle rocce a diversa permeabilità e con l'assetto strutturale (quest'ultimo evidenziato dalle sezioni idrogeologiche), consente di definire la situazione idrogeologica globale dell'area. Trascurando gli affioramenti dei termini della Falda Toscana, dei quali si è già accennata la scarsa importanza ai fini di questo studio, la situazione è, in grandi linee, la seguente.

La serie carbonatica formata dai Marmi s.l., dai Grezzoni e, localmente, dai Calcari Selciferi, costituisce, come si è già detto, un importante acquifero a circolazione prevalentemente carsica, delimitato in basso dalle rocce praticamente impermeabili del basamento ed in alto da rocce a permeabilità medio-bassa o bassa, calcescisti e diaspri soprattutto.

In questo acquifero, però, l'andamento della superficie di base, impermeabile, delle rocce carbonatiche solo localmente guida il deflusso sotterraneo. Poiché il complesso assetto strutturale delle Alpi Apuane porta tale superficie a quote molto diverse, anche ben al di sotto del livello del mare, la circolazione idrica è prevalentemente condizionata dalla differenza di quota tra il fondo delle valli del versante Nord-Est e quello delle valli del versante Sud-Ovest: nella

Garfagnana il livello di base carsico si trova al di sopra di 500 m di quota, mentre nel versante marino scende fra 200 e 300 metri.

Questa differenza di quota, che ha la sua causa nell'evoluzione tettonica recente della regione (FEDERICI e RAU, 1980), è alla base del prevalente deflusso di sottosuolo da NE a SW e quindi della cattura, da parte del Frigido, di acque dei bacini contigui.

L'assetto strutturale, di cui le ampie pieghe con andamento circa Nord-Sud costituiscono gli elementi di dimensioni maggiori, fa sì che l'acquifero carsico venga diviso in più unità idrogeologiche. Il bacino del Frigido, in particolare, drena tre diversi ed estesi acquiferi attraverso altrettante sorgenti.

Il primo è quello compreso nella sinclinale di Carrara e nelle strutture minori associate, le cui acque alimentano sia la sorgente del Cartaro, nel bacino del Frigido, che altre grosse sorgenti nel bacino del Carrione.

Il secondo e più vasto acquifero alimenta la Sorgente di Forno e comprende la sinclinale di Orto di Donna, l'anticlinale del Monte Sumbra e parte delle strutture più ad Est.

Questo secondo acquifero è nettamente separato dal primo dal nucleo impermeabile dell'anticlinale di Vinca. Verso Nord esso alimenta anche le sorgenti carsiche situate presso Equi Terme, mentre verso SE è in continuità con l'acquifero del Monte Sumbra, il quale alimenta, almeno in parte, la Sorgente della Pollaccia.

Un terzo acquifero carsico, separato dal precedente solo da una incisione valliva, il Canale di Renara, e non da barriere idrogeologiche, è ben localizzato al nucleo della sinclinale del Monte Altissimo. Questo acquifero alimenta la Sorgente di Renara, nell'omonimo canale, e quella più modesta della Polla nel vicino bacino del Vezza.

Un acquifero più piccolo, anch'esso a circolazione carsica, è quello che alimenta la Sorgente di Altagnana, nei pressi dell'omonimo paese, e che comprende per intero il nucleo carbonatico della piccola sinclinale del Monte Carchio.

Altri piccoli acquiferi isolati, con caratteristiche carsiche, si trovano anche nei Calcari Selciferi ad Entrochi.

I tre acquiferi maggiori sono dunque condivisi da più bacini idrografici e rappresentano perciò le vie attraverso cui avvengono le catture delle acque sotterranee a vantaggio del Fiume Frigido. Ciò appare particolarmente evidente nel caso della Sorgente del Cartaro, la cui area di alimentazione compresa fra l'emergenza e lo spartiacque superficiale risulta estremamente piccola in rapporto alla portata.

5 — CARSISMO E CIRCOLAZIONE SOTTERRANEA

Come già accennato nel capitolo di inquadramento geomorfologico, i fenomeni carsici condizionano in maniera determinante non solo l'aspetto esterno dalle Alpi Apuane ma anche quello «interno» e, con esso, la circolazione sotterranea.

Tralasciamo qui la descrizione delle forme carsiche di superficie, oggetto di studi precedenti (MARCACCINI, 1964; FEDERICI *et al.*, 1981), e dedichiamo invece questo breve capitolo ai fenomeni carsici ipogei. La loro conoscenza è infatti di fondamentale importanza per capire direzioni e modalità della circolazione idrica all'interno degli acquiferi carsici.

Delle circa 300 grotte conosciute nel bacino del Frigido e nelle aree limitrofe (le principali delle quali sono riportate nella Tav. 1) la maggior parte si trova nelle zone di assorbimento in quota e sono per lo più costituite da pozzi verticali ostruiti dopo qualche decina di metri dai detriti caduti dall'imbocco.

Non mancano comunque grotte anche di grandi dimensioni e notevole profondità; tra queste citeremo solo quelle che sono state oggetto di prove di tracciamento.

Nei pressi della vetta del M. Tambura si apre l'Abisso P. Roveri (n.705 T/LU), profondo ben 760 metri e con 2500 m di sviluppo.

Questa cavità presenta, intorno ai 400 m di profondità, una serie di grandi ambienti, tra cui un pozzo verticale di oltre 300 m (uno dei maggiori del mondo) e un vasto salone (m 100×50×60 circa).

Lo scorrimento idrico è, in condizioni normali, modesto e legato a fenomeni di ringiovanimento.

Una colorazione effettuata dal Gruppo Speleologico Bolognese (FORTI, 1981) nell'Agosto del '79 ha dimostrato che le acque circolanti in questa grotta emergono dopo solo 56 ore alla Sorgente di Forno. Questo comporta una velocità media orizzontale di 80 m/h, che indica come il deflusso avvenga a pelo libero per la quasi totalità del percorso.

Fra le grotte che sono risultate in collegamento idraulico con il bacino del Frigido, la più lontana è l'Abisso della Malachite, sul versante Nord del M. Pisanino, che fu colorato da speleologi polacchi nell'estate del 1985.

Dopo ben 37 giorni si trovarono tracce di fluorescina alla Sorgente di Forno, distante quasi 7 km, con una velocità di scorrimento di soli 8 m/h, valore estremamente basso, dovuto forse al periodo eccezionalmente secco in cui fu eseguita la prova.

Nella bella conca glaciale della valle di Arnetola si trova un'elevata concentrazione di grotte ad andamento verticale, di profondità compresa fra i 900 metri dell'Abisso dello Gnomo (non catastato) e i 400 m della Buca della Pompa (n. 317 T/LU).

Queste grotte (nn. 642, 643, 644, 645, 646 T/LU) hanno la caratteristica di terminare tutte alla quota di circa 500 m s.l.m. con un sifone che corrisponde al livello della falda profonda.

Due di queste cavità, e precisamente l'Abisso F. Simi (n.643 T/LU) e la Buca della Pompa, furono colorate rispettivamente nel 1983 e nel 1984 da speleologi di Lucca e di Livorno. Entrambe dettero esito positivo alla Sorgente di Forno, dimostrando così che, con ogni probabilità, tutta la conca di Arnetola drena verso il Frigido anziché nel bacino dell'Edron.

In questo caso i tempi di risposta furono assai lunghi (rispettivamente 43 e 22 giorni), suggerendo una circolazione lenta in condizioni freatiche.

Un altro gruppo di profonde cavità si trovano nella zona del M. Altissimo; tra queste vale la pena di ricordare la Buca di M.Pelato (n. 456 T/LU), profonda 650 m e con 2800 m circa di sviluppo. Nella parte finale di questa grotta si trova un grosso collettore sotterraneo (la cui portata oscilla tra 30 e 100 l/s), seguibile per diverse centinaia di metri fino ad un sifone.

L'acqua di questo torrente riemerge, come dimostrato da una colorazione eseguita nel '75 da speleologi bolognesi, nella vicina Sorgente di Renara, percorrendo prima l'omonima grotta.

Sempre alla Sorgente di Renara ha dato esito positivo una colorazione eseguita dalla Federazione Speleologica Toscana nei primi mesi dell'89 in una grotta, denominata Abisso Tripitaka, che si trova nei pressi dell'abitato di Campagrina.

Sul lato occidentale del bacino del Frigido la cavità più importante è invece la Buca di Fonte Luccica (n. 330 T/LU), che recenti esplorazioni hanno portato a 450 m di profondità per oltre 2 km di sviluppo. La particolarità di questa bella grotta è che si tratta dell'unica, nella zona, a presentare un sistema di antiche gallerie freatiche situate ad una quota di circa 600 m s.l.m.. Scarso, e anche qui legato a fenomeni di ringiovanimento, è invece lo scorrimento idrico attuale.

Una colorazione eseguita nell'86 appositamente per questo studio dimostrò che le acque del principale ramo attivo di questa grotta riemergono alla Sorgente del Cartaro, distante 4,3 km. La velocità di scorrimento risultò di circa 30 m/h, che indica un deflusso

prevalentemente a pelo libero, considerando anche che la colorazione fu eseguita durante un periodo di magra.

Tutte le grotte descritte finora si trovano, da un punto di vista geografico, al di fuori del bacino del Frigido. Entrando nel bacino idrografico troviamo, nelle zone più elevate, numerose piccole cavità verticali di assorbimento, mentre nelle fasce più basse si aprono diverse grotte ad andamento orizzontale, tra cui: la Buca della Renella (n. 272 T/LU), la Buca del Rocciolo (n. 229 T/LU) e la Buca di Renara (n. 228 T/LU). Sono tutte delle risorgenti, alcune delle quali ancora temporaneamente attive.

Nel Bacino del Frigido, però, la cavità più interessante, da un punto di vista idrogeologico, è la Buca del Pianone o Abisso della Tambura (n. 463 T/LU), che si apre a quota 900 nel canale di Resceto, ed è profonda 370 m, per uno sviluppo di oltre 3 km e tuttora in esplorazione.

Nelle parti profonde di questa grotta scorre un grosso collettore, la cui portata media è intorno a 100 l/s e che una colorazione (FORTI, 1981) ha confermato essere uno dei tributari della Sorgente di Forno.

Nonostante le intense ricerche condotte da numerosi speleologi, ultimamente soprattutto toscani, a tutt'oggi non si conosce ancora il percorso del collettore principale che alimenta la Sorgente di Forno.

In base ad una interpretazione qualitativa della struttura geologica, si può però supporre l'esistenza di due collettori: uno che raccoglie le acque del M. Grondilice e del Canale Fondone; l'altro, di dimensioni maggiori, che drena i massicci del M. Pisanino e del M. Tambura ricevendo da affluenti di sinistra (uno dei quali scorre nell'Abisso della Tambura) le acque assorbite nella Valle di Arnetola e nella zona del M. Sella.

6 — LE SORGENTI

Con le finalità di questa ricerca lo studio delle sorgenti assumeva una particolare importanza: tramite queste le acque infiltrate nei bacini contigui riemergono nel bacino del Frigido.

La distribuzione delle sorgenti e le loro portate costituiscono quindi gli elementi principali per individuare la posizione degli spartiacque sotterranei.

6.1 — *Censimento delle sorgenti*

Un recente e molto accurato lavoro svolto in proposito dalla Cooperativa Geoversilia (1980), su commissione della Comunità Montana Apuo-Versiliese, ha semplificato il lavoro di ricerca delle sorgenti nel bacino del Frigido. Tale ricerca è stata però estesa ai bacini contigui a quello del Frigido, in quanto la posizione e la portata delle sorgenti potevano fornire utili indicazioni per tracciare i limiti idrogeologici del bacino.

Per i bacini del Carrione, del Canale di Montignoso, del Vezza e della Turrite Secca si sono usati ancora i dati della Cooperativa Geoversilia. Per i bacini dell'Edron e del Serchio di Gramolazzo si è fatto riferimento al censimento eseguito per conto della Regione Toscana, aggiungendovi alcune sorgenti che non vi figuravano. Per il bacino del Lucido, infine, è stato necessario eseguire direttamente il censimento, aiutandosi soprattutto con le carte topografiche esistenti.

I dati caratteristici delle sorgenti con portata superiore ad un litro al secondo sono riportati nella Tav. 1. Le altre sono state solo ubicate nella Carta Idrogeologica.

La portata media indicata è da ritenersi solo approssimativa poiché ottenuta, nella maggior parte dei casi, con solo due o tre misurazioni. Nel caso delle sorgenti più grosse il maggior numero di misure di portata, parte trovate nella letteratura (PERRONE, 1912; MASINI, 1958 e 1960) e parte eseguite appositamente, ha permesso una migliore valutazione della portata media.

Analizzando i soli dati relativi alle sorgenti poste nel bacino del Frigido, si possono fare alcune considerazioni.

Una prima osservazione interessante riguarda la distribuzione in quota delle emergenze (Fig. 1A). Il grosso delle sorgenti si trova fra 200 e 500 metri, con la classe modale corrispondente alla fascia tra 300 e 400 m. Se confrontiamo questo diagramma con quello della distribuzione areale delle fasce altimetriche (Fig. 1B), si nota come la diminuzione del numero di sorgenti con la quota è correlato con il minore sviluppo areale delle fasce altimetriche superiori. C'è però una incongruenza: la maggiore estensione superficiale è della fascia fra 400 e 600 metri, mentre il maggior numero di sorgenti sta fra 400 e 200 m.

Più interessante risulta il diagramma con la portata globale delle sorgenti per ogni fascia altimetrica (Fig. 1C). Come si può osservare, la quasi totalità dell'acqua emerge ad un'altitudine compresa fra

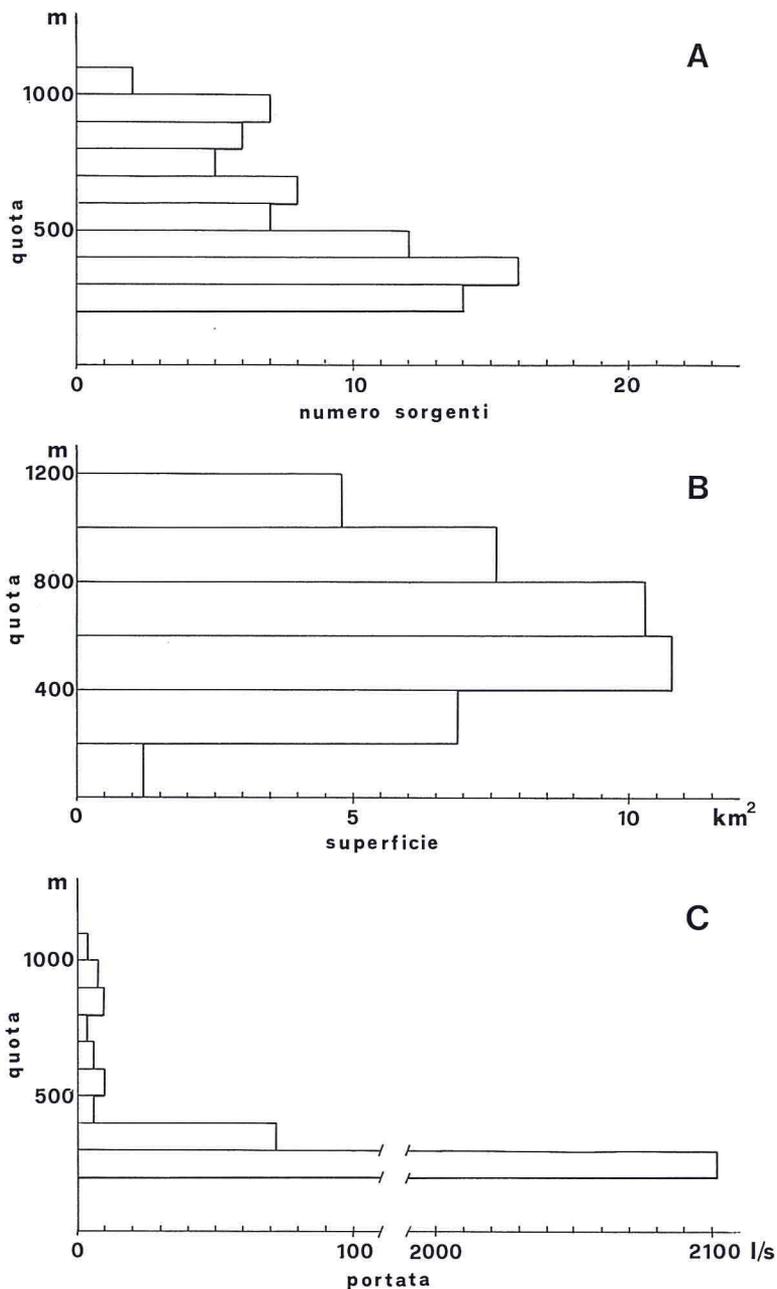


Fig. 1 - A) Distribuzione delle sorgenti del bacino del Frigido in funzione della quota; B) Estensione areale delle fasce altimetriche; C) Distribuzione delle portate globali delle sorgenti in funzione della quota.

200 e 300 metri. Ciò dipende dalla presenza, in questa fascia, delle più grosse sorgenti che alimentano il Frigido: la Sorgente di Forno, quella del Cartaro e quella di Renara, che globalmente hanno una portata di 2100 litri al secondo, pari al 95% della portata globale delle sorgenti. La quarta grossa sorgente, quella di Altagnana (60 l/s) si trova appena al di sopra della fascia altimetrica suddetta, a 305 m.

Dalla Carta Idrogeologica risulta che i punti in cui il contatto fra le formazioni carbonatiche ed il basamento cristallino si spinge più in basso si trovano appunto ad una altitudine di poco superiore a 200 metri. La quasi totalità dell'acqua emerge quindi alla base dell'acquifero carsico, nei punti topograficamente più bassi; infatti le tre sorgenti citate si trovano tutte nei pressi del contatto Grezzoni-basamento.

Si può concludere che la circolazione idrica nell'acquifero carsico ha raggiunto un elevato grado di gerarchizzazione e che il livello di base carsico è in equilibrio con quello esterno.

I dati relativi alle sorgenti situate nei bacini contigui a quello del Frigido non si prestano a considerazioni statistiche, anche perché il censimento riguarda solo una parte di questi bacini. Si possono tuttavia osservare alcuni elementi.

Nel bacino del Carrione c'è una situazione simile a quella del Frigido, con poche sorgenti, concentrate poco a valle di Bedizzano, che forniscono la quasi totalità delle acque. Queste sorgenti si trovano tutte pressappoco alla stessa quota della Sorgente del Cartaro, nel bacino del Frigido, alimentata dalla stessa unità idrogeologica.

Anche nella nella valle del Lucido la situazione è simile: qui le sorgenti maggiori si trovano nei pressi di Equi, con una portata globale media di 250 l/s circa. Le sorgenti di Equi sono verosimilmente alimentate dal massiccio carbonatico di Pizzo d'Uccello, che è in continuità con l'area di alimentazione della Sorgente di Forno.

Un'altro gruppo di sorgenti, anche di notevoli dimensioni, si trova nel Lucido di Vinca, poco a monte del paese di Monzone, con una portata globale media stimabile in 210 l/s. Poco si sa dell'area di alimentazione di queste sorgenti, ma verosimilmente dovrebbe comprendere parte del massiccio del M. Sagro.

Nel bacino del Serchio di Gramolazzo non ci sono grosse sorgenti, e questo sembra confermare l'ipotesi che gli acquiferi carbonatici di questo settore abbiano un drenaggio sotterraneo diretto verso SO, cioè verso il Frigido.

Nel bacino dell'Edron si conosce una sola grossa sorgente, quel-

la dell'Aiarone (attualmente sommersa dall'acqua del bacino artificiale di Vagli), sulla cui area di alimentazione è difficile fare ipotesi.

La Pollaccia è la principale sorgente nel bacino della Turrite Secca; la sua portata media è intorno a 900 l/s e il suo bacino di alimentazione dovrebbe comprendere i massicci calcarei del M. Fredone, del M. Sumbra e della Pania Secca.

Nel bacino della Vezza troviamo la Sorgente La Polla, alle pendici meridionali del M. Altissimo, poco sopra il contatto Grezzoni-Porfiroidi. L'area di alimentazione di questa sorgente comprende parte del M. Altissimo ed è quindi in continuità con quella della Sorgente di Renara nel bacino del Frigido.

Nel bacino del Canale di Montignoso, infine, non si trovano sorgenti di una qualche importanza.

6.2 — *Sorgenti carsiche principali*

Nel bacino del Frigido 4 sorgenti, quelle di Forno, del Cartaro, di Renara e la Polla di Altagnana, forniscono la quasi totalità dell'acqua di sottosuolo. Le loro caratteristiche ne fanno delle tipiche sorgenti carsiche: esse presentano forti variazioni di portata, cui si associano variazioni di temperatura, torbidità e, entro certi limiti, anche di concentrazione dei sali.

Data la loro importanza ai fini dello studio, in particolare per il bilancio idrologico, su queste sorgenti sono state fatte più misure di portata e si è cercato di individuarne l'area di alimentazione.

Sorgente di Forno

Questa sorgente, più nota come Sorgente del Frigido perché in condizioni normali è da essa che prende origine il corso d'acqua, è la maggiore delle sorgenti delle Alpi Apuane.

Già citata da Giovanni Spallanzani, che la visitò nel 1738, fu in seguito oggetto di osservazioni e studi in funzione della sua utilizzazione come forza motrice per il cotonificio, oggi abbandonato, che fu costruito nei suoi pressi nel 1890.

Attualmente la scaturigine è unica in seguito all'opera di captazione realizzata allo scopo, ma probabilmente in passato ce n'erano di più, disseminate lungo il canale.

L'acqua sgorga dai Grezzoni ad una quota di 235 m, circa 300 m a monte del contatto con i Porfiroidi del basamento.

Le prime misure di portata di cui si conserva documentazione risalgono al 1911 e furono eseguite da PERRONE (1912). Tra il 1950 e il 1952 l'Ufficio Idrografico di Pisa fece una serie di misure di portata a cadenza mensile, in previsione di utilizzare l'acqua per una piccola turbina elettrica (Ufficio Idrografico dell'Arno, 1950-1952).

Al fine di ricavare un valore medio di portata il più attendibile possibile, sono state eseguite altre misure tra Giugno 1986 e Maggio 1987 (Tab. 1).

TABELLA 1 — *Sorgente di Forno: misure di portata, temperatura e conducibilità.*

Giorno	Portata l/s	Temperatura °C	Conducibilità μ Siemens/cm
15-06-1986	1210		
17-07	880		
22-07	600		
27-07	460		
3-08	350		
8-08	300		
16-08	260		
25-08	260		
4-09	250		
13-09	410		
28-09	220		
16-10	470		
23-10	1250		
5-11	1400	10.0	234
9-12	2350		
10-01-1987	1930		
15-02	4200	10.2	160
4-03	1730	10.1	168
12-03	900	9.9	180
15-03	880		
20-03	1750	10.1	173
26-03	1950		
2-04	2900	9.7	170
16-04	2500		
1-05	1370	10.2	180
16-05	2250	9.6	

Alcune misure sono state eseguite, sia in condizioni di magra che di morbida, con un mulinello idrometrico in una sezione della canaletta che raccoglie le acque della sorgente. Con queste misure è stata costruita la curva che lega la portata all'altezza; altri valori sono stati ottenuti con la semplice misura dell'altezza dell'acqua in quel punto della canaletta.

Tenendo conto delle non favorevoli condizioni di misura, i valori di portata sono probabilmente inficiati da un errore valutabile entro il 10%.

Vi sono però altri fattori che rendono difficile eseguire delle misure precise. La Sorgente di Forno presenta alcune perdite, la principale delle quali si trova nel canale vicino, ad una quota leggermente inferiore a quella della sorgente vera e propria, la cui portata è pari a circa il 3-4% di quella della bocca principale. Inoltre c'è un'uscita di «troppo pieno», qualche centinaio di metri a monte della perdita e ad una quota di 250 metri, che, come si è potuto osservare, entra in funzione quanto la portata della sorgente supera i 4 m³/s circa.

Utilizzando tutte le misure disponibili, sia quelle riportate dagli Annali Idrologici che quelle appositamente eseguite, sono state ricavate delle portate medie mensili (Tab. 2). È chiaro che si tratta di portate approssimate, sia perché ottenute con misure non sistematiche, sia perché si riferiscono a mesi di anni diversi. Inoltre i valori sono più validi per i mesi estivi, quando sono state eseguite più misure. Un valore preciso si potrebbe ottenere solo con una misurazione in continuo, quale si può avere con una stazione di misura comprendente uno stramazzo ed un idrometrografo. Infatti la Sorgente di Forno, come tutte le sorgenti carsiche, presenta notevoli variazioni di portata in tempi brevi. In assenza di questa dobbiamo accontentarci delle misure saltuarie eseguite, dalle quali si ottiene una portata media annua di circa 1500 l/s.

Questa portata corrisponde al 65% di tutta l'acqua delle sorgenti del bacino, e al 29% della portata media del Frigido.

Questa portata così alta non può essere spiegata se non ammettendo un'area di alimentazione molto più estesa di quella compresa entro lo spartiacque superficiale. Tale ipotesi non è certo nuova, tanto è vero che è radicata convinzione degli abitanti della zona che l'acqua del Frigido venga dalla Garfagnana.

In base alla struttura geologica e ai risultati delle prove di marcatura con i traccianti chimici (vedi cap. 5) di acque sotterranee in zone esterne al bacino idrografico, si ha oggi un quadro abbastanza

TABELLA 2 — *Sorgente di Forno: portate mensili (l/s).*

Mese	1950	1951	1952	1986	1987	Media
Gen.	370	2185	1785		1930	1568
Feb.	2295		1815		4200	2770
Mar.	1360	2220			1442*	1647
Apr.	3270	2620	3810		2700*	3100
Mag.	2345	3015			1757	2372
Giu.	410		570	1210		730
Lug.	250	455	230	647*		395
Ago.			425	293*		359
Set.	275	440		293*		336
Ott.	520		1565	640*		908
Nov.		1200		1400		1300
Dic.		2530	2455	2350		2455

media = 1496

media annua stimata = 1500

* = media di più misure

TABELLA 3 — *Sorgente del Cartaro: portate mensili (l/s).*

Mese	1911	1966	1971	1972	Media
Gen.					—
Feb.				776	776
Mar.					—
Apr.	378*				378
Mag.					—
Giu.	571			338	454
Lug.	231*	191		187	203
Ago.	211	309	181	217	230
Set.	326*	223	149	255	238
Ott.			135	159	147
Nov.			863		863
Dic.			225		225

media = 390

media annua stimata = 400

* = media di più misure

preciso di quella che dovrebbe essere l'area di alimentazione di questa sorgente.

Secondo questi dati le zone di Orto di Donna, del Pisanino orientale, della Carcaraia, la valle di Arnetola e forse anche la zona subito a Sud di Passo Sella drenano tutte verso la valle del Frigido e la Sorgente di Forno.

La temperatura dell'acqua oscilla intorno ai 10°C, senza sostanziali variazioni fra estate e inverno. Le variazioni sembrano più legate alle variazioni di portata che alla stagione, ma le osservazioni sono troppo poche per trarre conclusioni significative.

Il valore medio delle conducibilità elettrica risulta di circa 180 $\mu\text{S/cm}$ alla temperatura media di 10,2°C. Riportando questo valore alla temperatura standard di 25°C con la formula:

$$C_{25} = C_0 (1 + Dt \times 0,02)$$

dove C_0 è la conducibilità misurata alla temperatura T_0 e Dt è la differenza di temperatura $25 - T_0$, si ottiene il valore di 235 $\mu\text{S/cm}$.

Si tratta quindi di acqua a bassa salinità, nonostante la circolazione in rocce carbonatiche solubili. Ma questo è abbastanza normale per gli acquiferi carsici, nei quali la circolazione è piuttosto veloce.

Utilizzando i valori di portata misurati fra il 17 Luglio ed il 16 Ottobre 1986, si è ricostruita la curva di esaurimento della sorgente in assenza di precipitazioni.

Secondo SCHOELLER (1967) una sorgente carsica presenta tipicamente una curva di esaurimento complessa che, in prima approssimazione, è la somma di tre curve con diverso andamento, ognuna legata ad un diverso tipo di drenaggio sotterraneo.

Schoeller ipotizzò che all'interno di un acquifero carsico il deflusso avvenga secondo tre tipi di percorso: i grossi condotti carsici; le fessure allargate ed i piccoli condotti; le minute diaclasi non ancora allargate dalla corrosione. Ciascuna di queste vie di drenaggio avrebbe la sua curva di esaurimento, ovviamente con pendenza diversa. Poiché le curve di esaurimento sono espresse da funzioni esponenziali, riportando i punti delle misure su di un diagramma semilogaritmico si dovrebbe ottenere una linea spezzata di tre segmenti.

Nella figura 2 ci sono il diagramma normale e quello semilogaritmico della portata in funzione del tempo. Come si vede, anche nel secondo diagramma i punti sembrano distribuirsi secondo una curva e non lungo tre rette; semmai si può individuare una retta nell'ultimo tratto.

Questo andamento può dipendere in parte dal fatto che le misu-

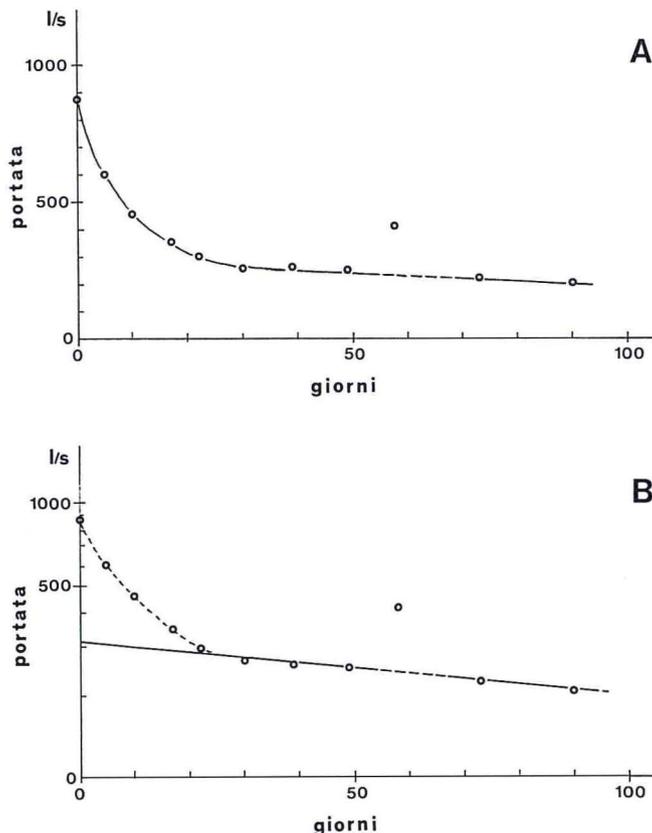


Fig. 2 - Curva di esaurimento, fra il 17.7.1986 e il 19.10.1986 della Sorgente di Forno, in scala aritmetica (A) e semi-logaritmica (B).

re non sono abbastanza ravvicinate nel tempo; ma è anche probabile che il regime della sorgente sia più complesso del modello teorico di Schoeller. Certamente la Sorgente di Forno ha un'ampia area di alimentazione, con una circuitazione veloce (come testimoniano le improvvise piene) ed una lenta (come dimostrano i lunghi tempi di risposta di alcune colorazioni). È probabile che l'alimentazione relativamente veloce, ma di provenienza lontana, si mescoli con quella vicina e più lenta, in modo da rendere impossibile la differenziazione dei primi due segmenti, mentre il terzo, corrispondente alla circolazione più lenta, appare con più evidenza.

Con il tratto finale della curva possiamo quindi calcolare il coefficiente di esaurimento relativo all'acqua immagazzinata nelle diaclasi minori.

Secondo MAILLET (1905) la curva di esaurimento di una sorgente si può esprimere con la formula:

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t} \quad \text{da cui} \quad \alpha = -1/t \cdot \ln Q_t/Q_0$$

dove Q_t è la portata misurata al generico istante t , Q_0 la portata al tempo preso come punto di partenza e α il coefficiente di esaurimento.

Prendendo $t = 90$ giorni, $Q_0 = 305$ e $Q_t = 200$ si ottiene un coefficiente di esaurimento $\alpha = 0,0047$, che rientra nell'ordine di grandezza proposto da Schoeller per questo tipo di drenaggio sotterraneo.

Possiamo anche calcolare il volume approssimativo di acqua immagazzinata W , a partire dal tempo t_0 attraverso la relazione $W = Q_0/\alpha$. Nel nostro caso otteniamo $W = 5.606.808.510$ litri.

Dunque la quantità d'acqua immagazzinata dalle fratture non allargate dalla corrosione al tempo t_0 , che nel nostro caso corrisponde al 17 Luglio, è pari a circa $5,6 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Sorgente del Cartaro

È la seconda sorgente in ordine di grandezza del bacino del Frigido e si trova a quota 205 nel Canale delle Rocchette, poco sopra al contatto Grezzoni-Porfiroidi.

Anche di questa Perrone e l'Ufficio Idrografico di Pisa eseguirono nel '66, '71 e '72 una serie di misure, la cui media dà una portata di circa 320 l/s (Tab.3). Tali misure sono però male distribuite durante l'anno, essendo concentrate nel periodo estivo e mancando misure nei mesi di Gennaio, Marzo e Maggio, tutti con portata certamente superiore alla media.

Attualmente la sorgente è captata dall'acquedotto di Massa e non è stato possibile fare altre misure. Tenendo conto di quanto sopra, ma anche del fatto che probabilmente i valori misurati a Febbraio e a Novembre sono forse relativi a condizioni di piena, si può stimare una portata media annua di circa 400 litri al secondo (Tab. 3).

Anche questa sorgente, come quella di Forno, ha una portata troppo alta per essere alimentata solo dall'area compresa fra l'emergenza e lo spartiacque superficiale.

L'esito positivo della prova di tracciamento effettuata in una grotta (Buca di Foce Luccica n. 330 T/LU), situata nell'alta valle di Colonnata, sembra confermare l'ipotesi che tutta questa zona rientri nell'area di alimentazione della Sorgente del Cartaro

Sorgente di Renara

La sorgente, o meglio, le sorgenti di Renara, poichè di più scaturigini si tratta, si trovano nell'omonimo canale ad una quota di circa 290 m (per l'emergenza principale) e circa 500 m a monte del contatto tra Grezzoni e basamento.

Prima di uscire all'esterno, l'acqua è osservabile in una grotta (Buca del Rocciolo) che si trova poco più a monte, sul versante sinistro del canale. La portata interna è più o meno la stessa di quella all'esterno, il che esclude che vi siano apporti di subalveo di una certa entità.

PERRONE (1912) riporta una serie di misure di portata, limitate però al periodo Aprile-Settembre del 1911, da cui risulta una portata media di 157 l/s.

Per avere un valore più attendibile sono state eseguite alcune misure approssimate (la misura è difficile perchè si tratta di una sorgente di alveo) nei mesi a maggiore portata. Da queste misure e da quelle di Perrone (Tab.4) si ottiene una portata media di 195 l/s, che si possono arrotondare a 200, vista l'approssimazione delle misure.

TABELLA 4 — *Sorgente di Renara: portate mensili (l/s).*

Mese	1911	1986	1987	Media
Gen.				—
Feb.			300	300
Mar.			260	260
Apr.	289*		330	310
Mag.	300			300
Giu.	308*			308
Lug.	70*	75		73
Ago.	70	70		70
Set.	103	50		77
Ott.		160*		160
Nov.		220		220
Dic.				—

media = 195

media annua stimata = 200

* = media di più misure

L'area di provenienza di queste acque è ben conosciuta: essa comprende parte della sinclinale del M. Altissimo, racchiusa dalle rocce impermeabili del basamento verso Est e verso Ovest. Due prove di marcatura di acqua sotterranee in altrettante grotte del M. Altissimo, una delle quali ha dato esito positivo per questa sorgente e l'altra per la Sorgente La Polla, nel bacino del Vezza, consentono di posizionare con buona approssimazione il limite Nord dell'area di alimentazione sotto la cresta dell'Altissimo.

Polla di Altagnana

È la minore tra le sorgenti carsiche principali del Frigido. Anch'essa sgorga dai Grezzoni poco sopra il contatto con il basamento, ad un'altitudine di 305 m circa.

Le misure di portata, eseguite ancora una volta da PERRONE (1912), danno due valori di massima (180 e 130 l/s) e due di minima (28 e 22 l/s).

Attualmente la sorgente è sepolta sotto i detriti di una piccola cava abbandonata; è però possibile fare delle misure approssimative di portata nel fosso poco a valle del punto di emergenza attuale.

Quattro nuove misure, eseguite fra il 1986 e il 1987, i cui valori sono di 30, 15, 60 e 80 l/s, fanno ritenere come probabile una portata media annua di circa 60 l/s.

La zona di alimentazione di questa sorgente è molto ben definita perchè comprende il nucleo carbonatico di una piccola sinclinale completamente circondato da rocce impermeabili.

7 — BILANCIO IDROLOGICO

Come già accennato nella premessa, il bacino del Frigido è uno dei più eclatanti esempi italiani di non corrispondenza fra bacino idrogeologico e bacino idrografico.

La formula del bilancio idrologico può essere scritta;

$$P + S = D + E + I$$

con P = precipitazioni, S = surplus idrico, pari alla quantità di acqua catturata dai bacini contigui, D = deflussi, E = evapotraspirazione e I = infiltrazione nel bacino.

Dei cinque parametri, P e D si possono ottenere dalle misure pluviometriche e da quelle di portata del Frigido, E si può calcolare con una certa approssimazione con le formule comunemente usate,

I e S sono assai più difficili da calcolare.

Possiamo trascurare l'infiltrazione I se estendiamo il bilancio ad un numero di anni abbastanza alto, tale da poter considerare in equilibrio quantitativo l'acqua infiltrata nel bacino idrografico con quella restituita dalle sorgenti del bacino stesso; in questo caso il termine I si dividerà fra D ed E. Infatti la situazione geologico-strutturale permette di escludere che parte dell'acqua infiltrata nel bacino defluisca sotterraneamente verso i bacini contigui. Il bilancio si può quindi ridurre alla formula.

$$P + S = D + E$$

In questo capitolo vengono presentati il calcolo di P, D ed E e viene fatto il confronto fra il surplus idrico ottenuto per differenza ($S = D + E - P$) e la quantità di acqua che si infiltra in quelle aree contigue al bacino del Frigido che, in base alla situazione geologica ed alle prove di colorazione, appartengono probabilmente al bacino idrogeologico dello stesso Frigido.

Il bacino idrografico del Frigido cui si riferisce il bilancio è quello sotteso dalla stazione di Canevara e misura 46,7 km².

Il periodo scelto per il calcolo del bilancio è quello compreso tra il 1950 e il 1972. Tale scelta è stata condizionata principalmente dal fatto che è solo per questo periodo che l'Ufficio Idrografico di Pisa ha pubblicato le misure di portata rilevate all'idrometrografo di Canevara; negli anni precedenti al '50 venivano infatti pubblicate solo le altezze, mentre per quelli successivi al '72 non ci sono dati pubblicati. In questo periodo, d'altra parte, sono stati rilevati il maggior numero di dati pluviometrici. 23 anni sono in ogni caso un periodo di tempo sufficientemente lungo per ottenere un bilancio annuale medio significativo.

7.1 — *Calcolo dell'altezza di precipitazione*

Benché sugli Annali Idrologici (1972, parte II) sia riportato il valore medio di precipitazione sul bacino del Frigido per il periodo '50-'72, si è preferito ricalcolare tale parametro convinti del fatto che non fosse molto valido.

Si tratta infatti di un valore ottenuto con il metodo delle isoiete, che in questo caso produce un errore non piccolo, dato che le stazioni pluviometriche presenti nella zona si trovano a quota bassa rispetto alla quota media del bacino. Questo fatto porta certamente ad una sottostima dell'altezza di precipitazione, in quanto non si

tiene conto dell'incremento dell'altezza di precipitazione con la quota.

Individuate le 14 stazioni presenti nel bacino del Frigido e nei bacini vicini (Tab.5), il primo passo è stato quello di calcolare per ognuna di esse il valore medio di precipitazione nel periodo considerato, dato che molte stazioni risultano lacunose di dati. Ciò è stato fatto con interpolazioni ed estrapolazioni, facendo riferimento ai dati delle stazioni vicine.

Tre stazioni hanno funzionato regolarmente per tutti e 23 gli anni, e cioè quelle di Massa, Retignano e Campagrina. Solo pochi dati mancano per le stazioni di Carrara, Casania e Isola Santa. Trattandosi di pochi valori sarebbe stato forse lecito trascurarne la mancanza, se non fosse che la maggior parte dei dati mancanti si riferisce ad anni con precipitazioni inferiori alla media.

Confrontando i regimi pluviometrici pluriennali delle 6 stazioni,

TABELLA 5 — Stazioni pluviometriche delle Apuane Nord-occidentali

Stazione	Bacino	Quota	Anni osserv.
Carrara	Carrione	112	50-55, 60-72
Fossacava	»	670	51-63
Rif. Belvedere	»	1260	68-72
Massa	Frigido	65	50-72
Casania	»	343	50-55, 58-72
Fondone	»	500	51-66
Retignano	Veza	440	50-72
La Polla	»	604	56-72
Terrinca	»	486	61-69
Campagrina	Turrite Secca	850	50-72
Isola Santa	»	585	52-72
Vagli (diga)	Edron	565	55-72
Gramolazzo (diga)	Serchio di G.	614	54-72
Orto di Donna	»	1097	50, 51, 53, 55, 57-63

si sono individuate le coppie di stazioni che presentano le relazioni più strette. Come era da aspettarsi, data la loro posizione, le relazioni migliori si sono trovate per Massa con le stazioni di Carrara e Casania, e per Campagrina con Isola Santa. Sono state quindi calco-

late le relazioni lineari di regressione tra i valori di precipitazione delle coppie:

$$\begin{aligned} \text{Carrara (Y) e Massa (X)} & \quad Y = 1,33 X - 217,7 \\ \text{Casania (Y) e Massa (X)} & \quad Y = 1,87 X - 239,6 \\ \text{Isola Santa (Y) e Campagrina (X)} & \quad Y = 0,77 X + 133,3 \end{aligned}$$

Con queste relazioni sono stati riempiti i buchi relativi ai dati mancanti.

Partendo dai dati di queste 6 stazioni, con lo stesso metodo sono state colmate le lacune di dati di tutte le altre stazioni pluviometriche. Le relazioni lineari ottenute per ogni coppia di stazioni sono le seguenti:

$$\begin{aligned} \text{Fossacava - Carrara} & \quad Y = 0,90 X + 298 \\ \text{Rif. Belvedere - Carrara} & \quad Y = 1,04 X + 625 \\ \text{Fondone - Massa} & \quad Y = 1,71 X - 118 \\ \text{La Polla - Retignano} & \quad Y = 0,96 X + 408 \\ \text{Terrinca - Retignano} & \quad Y = 0,85 X - 198 \\ \text{Vagli - Isola Santa} & \quad Y = 0,76 X - 54 \\ \text{Gramolazzo - Isola Santa} & \quad Y = 0,64 X - 61 \\ \text{Orto di Donna - Campagrina} & \quad Y = 0,95 X - 191 \end{aligned}$$

Da cui si ottengono, sostituendo alla X il valore di precipitazione media della stazione di confronto, i valori medi relativi al periodo 50-72 riportati nella tabella riassuntiva 6.

TABELLA 6 — *Tabella riassuntiva dei dati delle stazioni pluviometriche*

Stazione	q	P	g.p.	e.q.	Plm
Carrara	112	1455	0.60	65	1390
Fossacava	670	1610	»	400	1210
Rif. Belvedere	1260	2140	»	755	1385
Massa	65	1225	1.79	115	1110
Casania	343	2070	»	610	1460
Fondone	500	1980	»	895	1085
Retignano	440	2005	»	785	1220
La Polla	604	2340	»	1080	1260
Terrinca	486	1900	»	870	1030
Campagrina	850	3240	»	1520	1720
Isola Santa	585	2705	»	1045	1660
Vagli (diga)	565	2010	»	1010	1000
Gramolazzo (diga)	614	1660	»	1100	560
Orto di Donna	1097	2900	»	1965	935

Legenda: q = quota
P = precipitazione annuale media per gli anni 50-72
g.p. = gradiente pluviometrico (mm/m)
e.q. = effetto quota (mm)
Plm = Precipitazione teorica a livello mare (mm)

Per il calcolo della precipitazione annuale media sul bacino è stato usato un metodo che permette di tenere conto dell'incremento di precipitazioni con la quota (CICALI e PRANZINI, 1984).

Ciò è determinante per quest'area delle Apuane, nella quale vi sono poche stazioni pluviometriche e, soprattutto, mal distribuite rispetto alla quota: la quota media delle 14 stazioni è di 585 m, contro i 760 del bacino.

Il procedimento consiste nel calcolare per prima cosa il gradiente pluviometrico medio, cioè l'incremento medio di P con la quota. Nel caso specifico sono stati calcolati due diversi gradienti pluviometrici: uno, di 1,79 mm/m per la maggior parte dell'area studiata; un altro, di 0,6 mm/m, per il bacino del Carrione. Ciò perchè le stazioni di questo bacino (Carrara, Rifugio Belvedere e Fossacava) si dispongono lungo una retta nettamente distinta.

Con questi gradienti è stato possibile calcolare, per ogni stazione, la precipitazione media annua che si avrebbe al livello del mare. I valori così ottenuti sono stati utilizzati per costruire la carta con le isoiete al livello del mare, da cui si è ricavato il valore medio di precipitazione (teorica) al livello del mare: 1284 mm.

È stata poi calcolata la quota media del bacino del Frigido sulla carta al 25.000, ottenendo il valore di 760 m.

Con la relazione $P = P_o + (q \cdot G_p)$

essendo $P_o = 1284$ mm, $q = 760$ e $G_p = 1,79$ mm/m si è ottenuta una precipitazione media annua $P = 2644$ mm. Si consideri che il valore riportato negli Annali Idrologici per lo stesso periodo è di 2270 mm.

Con lo stesso metodo è stata calcolata la precipitazione media annua dei diversi settori dei bacini contigui indiziati di far parte del bacino idrogeologico del Frigido, in modo da poter calcolare l'infiltrazione (vedi più avanti). Naturalmente per il bacino del Carrione è stato usato il valore di $G_p = 0,6$ mm/m.

7.2 — *Calcolo dell'altezza di deflusso*

Questo termine di bilancio è facile da calcolare, almeno in teoria. Gli Annali Idrologici riportano, a partire dal 1950, le misure delle portate giornaliere, mensili ed annuali espresse in m^3/s relative all'idrometrografo di Canevara.

Per il periodo considerato (1950 - 1972) si ottiene una portata

media annua di 6,41 m³/s. Vedremo, in sede di discussione del bilancio, che questo valore è molto probabilmente superiore a quello reale.

Comunque, accettando per ora come valido questo dato, dividendo il volume deflusso medio annuo per l'area del bacino idrografico (46.700.000 m²) si ottiene una lama d'acqua deflussa $D = 4331$ mm.

La tabella 7 contiene le portate medie e le relative altezze di deflusso calcolate per gli anni dal 1950 al 1972 (ad esclusione dell'anno 1970, in cui la stazione non ha funzionato).

TABELLA 7 — Stazione di Canevara: misure di portata e deflusso

Anno	Portata m ³ /s	Deflusso mm
1950	5.44	3676
1951	8.74	5905
1852	8.46	5717
1953	3.19	2156
1954	6.00	4054
1955	5.92	4000
1956	4.86	3284
1957	5.54	3743
1958	5.45	3683
1959	8.07	5453
1960	9.61	6494
1961	4.25	2872
1962	3.07	2075
1963	9.83	6643
1964	7.35	4967
1965	10.10	6825
1966	8.49	5737
1967	4.08	2757
1968	5.78	3906
1969	5.67	3831
1970	—	—
1971	5.70	3852
1972	5.40	3649
media	6.41	4330

7.3 — *Calcolo dell'altezza di evapotraspirazione*

Il termine E del bilancio idrologico non si può avere da misure dirette ed è di difficile valutazione perchè dipende da molti fattori, alcuni dei quali assai complessi da ponderare.

Tra le relazioni sperimentali proposte per il calcolo di E le più usate sono quelle di Keller (TONINI, 1966) e di TURC (1954).

La prima utilizza il solo dato P dell'altezza media di precipitazione:

$$E = 0,058 P + 405$$

ed è particolarmente adatta per i bacini montani.

Nel nostro caso, con $P = 2644$ mm, si ottiene $E = 558$ mm.

La formula di Turc richiede invece, oltre il valore di P, anche la temperatura media annua.

Per il bacino del Frigido la mancanza di stazioni termometriche rendeva problematica la determinazione della T media; infatti è probabilmente poco corretto estrapolare i dati delle stazioni di Massa, Carrara e Retignano, le uniche esistenti nelle Alpi Apuane. Il bacino del Frigido, come dice il suo stesso nome, benché vicinissimo al mare ha, infatti, un microclima particolarmente freddo. Ciò è dovuto sicuramente alla morfologia, con valli strette e incassate e alte montagne che riducono l'insolazione a poche ore del giorno.

Si è ricorsi allora ad un espediente, reso possibile dalla presenza di numerose grotte. È noto che le grotte di un certo sviluppo hanno una temperatura interna che, salvo la presenza di forte circolazione di aria, è pressoché uguale a quella media pluriennale del punto di ingresso. Sono state perciò misurate le temperature dell'aria di alcune grotte, ricercando dati ulteriori nella bibliografia speleologica (PREVLOSEK e UTILI, 1967).

Dai valori di T si è risaliti alla relazione lineare media che lega la temperatura alla quota, la cui espressione è risultata:

$$T = 12,2 - 0,002 q$$

con T in gradi centigradi e q in metri.

Sostituendo a q il valore di quota medio del bacino del Frigido, 760 metri, si ottiene una temperatura media annua $T = 10,7^{\circ}\text{C}$.

Con questa temperatura è stata calcolata l'evapotraspirazione tramite la formula di Turc, la cui espressione è:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

con $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$.

L'evapotraspirazione reale risulta di 613 mm.

Oltre che con queste due relazioni sperimentali, l'evapotraspirazione è stata calcolata anche il metodo di THORNTWAITE (1957). Con questo metodo E si calcola come somma dei valori mensili, i quali risultano dal confronto fra l'evapotraspirazione potenziale e la quantità d'acqua disponibile sia per precipitazioni che come riserva nel suolo. Esso tiene conto di diversi fattori, alcuni legati alla posizione geografica altri alla natura del terreno e della copertura vegetale.

Poiché sono necessari i valori medi mensili della temperatura e delle precipitazioni, questi sono stati ottenuti facendo riferimento al regime termometrico della stazione di Retignano, che si trova nel vicino bacino di Seravezza, per la temperatura e alla stazione di Fondone per le precipitazioni: ciascun valore mensile è stato ottenuto mediante una semplice proporzione fra i valori medi annui ed il valore mensile osservato nella stazione di confronto.

Il calcolo di E è stato reso molto più speditivo con il programma di calcolo al computer preparato da PEZZATI e ROSSETTI (1986) sulla base delle tavole di THORNTWAITE e MATHER (1957).

La capacità di ritenzione media del terreno, dato necessario per il calcolo, è stata valutata di soli 50 mm, tenendo conto che nella parte alta del bacino affiorano per buona estensione le rocce nude.

Il valore medio annuo di E risulta uguale a 645 mm.

Confrontando i valori di E ottenuti con i tre metodi (558, 613 e 645 mm) vediamo che le differenze non sono alte, in relazione alla approssimazione dei dati di partenza. Per il bilancio idrologico si è scelto il valore ottenuto con la relazione di Turc, 613 mm, anche in considerazione del fatto che è molto vicino alla media dei tre valori, pari a 605 mm.

7.4 — *Bilancio idrologico*

Con i valori di P, D ed E sopra calcolati si può risalire al valore di S, cioè al surplus idrico del bacino del Frigido:

$$S = D + E - P = 4331 + 613 - 2644 = 2300 \text{ mm}$$

che corrisponde ad un eccesso di portata del fiume di 3,40 mc/s.

Con questi nuovi valori il coefficiente del deflusso risulta:

$$Cd = 4331/2644 = 1,64$$

Benché inferiore a quello riportato negli Annali Idrologici, essenzialmente per l'incremento di P, tale coefficiente è ancora molto

alto, risultando più del doppio di quanto sarebbe lecito attendersi per un bacino come quello del Frigido e con il nostro clima.

Eccoci quindi al punto centrale della nostra ricerca: si tratta di trovare una giustificazione quantitativamente soddisfacente al surplus idrico del Frigido, pari a ben il 53% del deflusso totale.

Accettando per buono il valore dell'evapotraspirazione reale, la cui eventuale correzione verso l'alto non potrebbe comunque togliere più di 100 mm al surplus idrico del Frigido, dei 2300 calcolati, vi sono tre possibili spiegazioni per questo eccesso di deflusso. La prima è che le precipitazioni siano ancora maggiori di quanto calcolato; la seconda che il deflusso a Canevara sia minore di quanto risulta dai dati degli Annali Idrologici; la terza che il surplus sia da imputare ad acque provenienti, per via sotterranea, dai bacini attigui.

Naturalmente è possibile che la spiegazione sia in due o anche in tutte e tre le cause, ognuna delle quali può contribuire ad incrementare il rapporto D/P.

La prima causa è da ritenere la meno probabile, o comunque quella che potrebbe ridurre solo in piccola parte il coefficiente di deflusso. Infatti una precipitazione media di 2644 mm è un valore già abbastanza alto, che comporta punte di oltre 4000 mm per le fasce altimetriche più elevate.

Il calcolo delle precipitazioni con il metodo adottato ha già notevolmente incrementato il valore di P rispetto a quello degli Annali (da 2270 a 2644) e, d'altra parte, è poco probabile che alle quote superiori l'aumento delle precipitazioni con la quota sia maggiore di quello lineare adottato. È anzi probabile che il maximum pluviometrico non coincida con la parte sommitale dei rilievi, la cui estensione areale è peraltro piccola, per cui l'influenza di una eventuale sovrastima sarebbe limitata.

La seconda possibile causa conviene per il momento metterla da parte, riprendendola in caso di non chiusura del bilancio eseguito per il bacino idrogeologico del Frigido. Infatti la terza causa è certamente presente: le colorazioni effettuate in diverse grotte dell'area studiata hanno dimostrato che il Frigido cattura acque dei bacini contigui e che quindi il suo bacino idrogeologico è più ampio di quello idrografico.

È dunque soprattutto sulla terza ipotesi, che è accertata solo in via qualitativa, che abbiamo lavorato per trovare una spiegazione quantitativa all'eccesso di deflusso.

7.5 — *Limiti del bacino idrogeologico del Frigido*

Nella Carta Idrogeologica è stato disegnato il probabile tracciato dei limiti idrogeologici del bacino del Frigido. Esso è basato su:

- la distribuzione delle formazioni geologiche a diverso grado di permeabilità;
- l'assetto strutturale;
- la posizione delle sorgenti e le relative portate;
- le linee di deflusso sotterraneo accertate per mezzo di colorazioni;
- la posizione degli spartiacque superficiali.

Partendo da Canevara e muovendosi in senso orario, si può notare che, da qui fino alla sommità de Le Rocchette, il limite idrografico e il limite idrogeologico coincidono, perché lo spartiacque corre su rocce impermeabili, salvo incontrare alcune lenti carbonatiche appartenenti all'Unità di Massa, la cui importanza è però limitata.

Oltre Le Rocchette lo spartiacque passa invece su rocce carbonatiche e buona parte della zona di Colonnata, che si trova oltre questo spartiacque, va ad alimentare la Sorgente del Cartaro. Il limite idrogeologico tracciato sulla Carta, che arriva sino alla Foce di Vinca e comprende buona parte del massiccio del Monte Sagro, è solo ipotetico. Gli unici dati al riguardo ci vengono dalla colorazione della Buca di Foce Luccica, di cui si è già parlato, la cui posizione non è peraltro ideale, aprendosi nei pressi della cresta che divide il bacino del Frigido da quello del Carrione. In realtà il punto di immissione del colorante si trova spostato verso Ovest di circa 500 metri e più in basso di circa 350, per cui abbraccia una zona più vasta di quella ipotizzabile dalla sola posizione dell'ingresso.

Il limite dell'area di alimentazione della sorgente del Cartaro è stato quindi tracciato a posteriori, in base alla sua portata media. L'area compresa fra il punto di emergenza e lo spartiacque superficiale ha una superficie di 2,2 km² ed una precipitazione intorno a 2200 mm. Stimando, in maniera approssimativa ma tenendo conto del bilancio idrogeologico complessivo (vedi più avanti), una infiltrazione pari al 70% della precipitazione, si ottengono dall'area solo 100 l/s: i rimanenti 300 l/s devono dunque essere di provenienza esterna. Se si estendono alla zona di Colonnata i valori di precipitazione e di infiltrazione suddetti, si ottiene un'area di alimentazione esterna al bacino del Frigido di circa 6 km².

Da Foce di Vinca a Foce Rasori spartiacque superficiale e idrogeologico tornano a coincidere per la presenza del nucleo impermeabile dell'anticlinale di Vinca.

I Grezzoni ed i Marmi che si incontrano dal M. Grondilice a Orto di Donna sono in continuità con quelli che affiorano al Pizzo d'Uccello, i quali probabilmente fanno già parte dell'area di alimentazione della Sorgente di Equi.

Dovrebbe dunque esistere uno spartiacque sotterraneo, che risulta molto difficile da posizionare esattamente poiché non ci sono prove di colorazione in questa zona e mancano indizi di natura geologica. Una valutazione approssimativa dell'area di alimentazione della Sorgente di Equi, basata sulla sua portata, suggerisce che lo spartiacque sotterraneo si trovi in corrispondenza di Foce a Giovo. Da questo punto il limite idrogeologico del bacino del Frigido dovrebbe spostarsi verso Est sino ad incontrare i terreni a bassa permeabilità della sinclinale di Orto di Donna, che lo riportano a coincidere con quello idrografico lungo la cresta del Monte Cavallo, per poi distaccarsene di nuovo seguendo la cresta che porta verso il Monte Pisanino e oltre, fino ad abbracciare la vasta area carsica a NE di questo. In quest'area si trova infatti la Buca della Malachite, di cui è stato accertato il collegamento idrologico con la Sorgente di Forno, distante quasi 7 km.

La mancanza di grosse sorgenti nella vallata di Gorfigliano rende lecito estrapolare il risultato di questa colorazione all'area di assorbimento situato a NE del M. Pisanino. Lo spartiacque idrogeologico dovrebbe perciò seguire approssimativamente il limite superficiale delle formazioni carbonatiche, salvo lasciar fuori piccole porzioni di Marmi che probabilmente alimentano alcune sorgenti a Sud di Gorfigliano. Dopo aver abbracciato il Monte Rocchandaglia e con esso tutta la Carcaraia, il limite del bacino reale del Frigido va, con ogni probabilità, ad includere tutta la valle di Arnetola, seguendo lo spartiacque dal Monte Pallerina al Monte Fiocca. C'è infatti da aspettarsi che tutte le acque che piovono in questa valle finiscano, prima o poi, per essere assorbite dai Marmi e andare quindi ad alimentare la falda profonda di questa zona che, come è stato accertato da alcune colorazioni, va ad alimentare la Sorgente di Forno.

Un fatto importante da notare al riguardo è che le intercalazioni filladiche al nucleo dell'anticlinale del M. Tambura non costituiscono, a causa della loro discontinuità, una barriera idrologica, contrariamente a quanto ipotizzato da MATTEINI (1981), ma possono al più rallentare il deflusso delle acque sotterranee verso il bacino del Frigido.

Dal M. Fiocca al M. Altissimo ci troviamo nuovamente di fronte ad una zona in cui dovrebbe esservi uno spartiacque sotterraneo

che delimita l'area di alimentazione della Sorgente della Pollaccia, nel bacino della Turrite Secca. L'unica prova di colorazione effettuata non consente un posizionamento preciso di tale spartiacque, anche per la mancanza di elementi geologici strutturali sicuri.

L'area di infiltrazione del M. Altissimo alimenta due sorgenti: la Sorgente di Renara nel bacino del Frigido e la Sorgente La Polla in quello del Serra. I risultati delle colorazioni eseguite anni addietro in due grotte di questa zona, una delle quali positiva a La Polla, fanno pensare che lo spartiacque fra le due sorgenti passi più o meno sotto la vetta del M. Altissimo.

Continuando verso SW si incontrano ancora le rocce del basamento e dunque non c'è differenza fra il limite idrografico e quello idrogeologico, questa volta definitivamente fino a Canevara, salvo brevi digressioni in corrispondenza degli affioramenti carbonatici del M. Focaraccia e del M. Carchio.

7.6 — *Correzione del bilancio*

L'ipotesi di bacino idrogeologico fatta per il Frigido in base alle considerazioni del paragrafo precedente prevede un ampliamento di circa 26,2 km², pari cioè al 56%.

Per verificare se tale ampliamento è in accordo con il surplus idrico riscontrato a Canevara, è stato fatto il bilancio idrologico dell'area aggiunta al bacino idrografico. Il calcolo è stato fatto separatamente per le tre zone esterne, che sono quelle di Colonnata, di Orto di Donna e del M. Pisanino-M. Altissimo.

Il calcolo delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione è stato fatto con le stesse modalità viste per il bacino idrografico del Frigido, naturalmente tenendo conto dei diversi parametri.

Per il bacino del Carrione è stato utilizzato il coefficiente altimetrico di precipitazione uguale a 0,60 mm/m, per le altre zone lo stesso del Frigido, 1,79 mm/m.

Quanto alla temperatura media, necessaria per il calcolo dell'evapotraspirazione con la relazione di Turc, per l'area di Colonnata si è usato lo stesso gradiente altimetrico del bacino del Frigido, mentre per le altre due zone si è usata la formula usata nello studio della Geoversilia (1980) per il bacino del Serchio; la sua espressione è: $T = 16,5 - 0,007 q$.

Qui di seguito riportiamo i valori calcolati per le tre aree.

Zona di Colonnata

superficie = 6,60 km²

precipitazione media annua P = 1737 mm

evapotraspirazione media annua E = 588 mm

P — E = 1149 mm, pari a 0,24 m³/s

Zona di Orto di Donna

superficie = 1,67 km²

precipitazione media annua P = 3632 mm

evapotraspirazione media annua E = 451 mm

P — E = 3171 mm, pari a 0,17 m³/s

Zona Est (M. Pisanino, Carcaraia, Arnetola, M. Altissimo)

superficie = 17,98 km²

precipitazione media annua P = 3523 mm

evapotraspirazione media annua E = 492 mm

P — E = 3031 mm, pari a 1,73 m³/s

La quantità P — E rappresenta la precipitazione efficace, cioè la quantità d'acqua suscettibile di infiltrarsi nel sottosuolo o di scorrere in superficie. Il valore globale di P — E è quindi di 2,14 m³/s.

A questo punto occorre valutare quanta di quest'acqua si infiltra nel sottosuolo e può quindi seguire vie sotterranee fino alle sorgenti del Frigido. Questo elemento costituisce purtroppo una incognita mal valutabile, in mancanza di studi specifici. In base alla scarsa letteratura in proposito (in particolare BONI e BONO, 1982), alla morfologia dell'area, alla densità di cavità assorbenti, alla portata globale delle sorgenti apuane, il coefficiente di infiltrazione si può valutare intorno all'80% della precipitazione efficace.

Con il valore suddetto si ottiene un totale di acqua infiltrata, che può quindi giungere al bacino del Frigido, di 1,71 m³/s.

Nel bilancio del bacino idrografico del Frigido avevamo un surplus di 3,40 m³/s; c'è ancora una eccedenza idrica di 1,69 m³/s che non trova spiegazione nonostante l'ampliamento dei limiti del bacino. Ancora una volta le ipotesi possibili sono tre:

- 1) il bacino idrogeologico è ancora maggiore di quanto stimato,
- 2) le precipitazioni sono ancora sottovalutate,
- 3) il deflusso è sopravvalutato.

Riguardo alla prima ipotesi, un controllo della attendibilità dell'estensione del bacino idrogeologico ricostruito si può avere confrontando la quantità calcolata di acqua che si infiltra nelle aree contigue con la portata delle sorgenti.

Nel paragrafo 6.2 si era già accennato al fatto che le tre principali sorgenti del Frigido, e cioè le sorgenti di Forno, Cartaro e Renara, hanno i loro bacini di alimentazione posti, almeno in parte, al di fuori dello spartiacque superficiale. La portata media globale delle tre sorgenti è di circa $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Secondo le ipotesi fatte, circa $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ proverrebbero dai bacini contigui e solo $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ dal proprio. Questi due valori (corrispondenti rispettivamente all'80 e al 20% circa) sono in buon accordo con l'estensione delle aree di alimentazione all'esterno e all'interno del bacino del Frigido, anche tenendo conto che il tasso di infiltrazione è probabilmente minore all'interno in ragione di una maggiore acclività del terreno (e questo è in accordo con le improvvise e forti piene del Frigido).

Una sostanziale, ulteriore estensione del bacino idrogeologico del Frigido (circa doppia di quella ipotizzata, se vogliamo giustificare gli ulteriori $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$ del deflusso) sarebbe possibile solo ammettendo che queste sorgenti abbiano una portata molto maggiore di quanto risulta dalle misure disponibili, oppure che vi siano delle importanti sorgenti di subalveo non rilevate.

Entrambe le possibilità sembrano da escludere. La prima perché la Sorgente di Forno, che contribuisce con il 70% dell'acqua, è anche quella di cui si hanno le misure di portata migliori e in maggior numero. La seconda perché tutte e tre le sorgenti si trovano molto vicine al contatto fra i Grezzoni ed il basamento impermeabile, e nel breve tratto fra questo contatto e le sorgenti non si notano incrementi consistenti di portata nei corsi d'acqua. C'è anche da dire che, in condizioni di magra, la portata del Frigido a Canevara è di poco superiore alla somma delle portate delle sorgenti.

Escluso quindi che il bacino idrogeologico del Frigido sia tanto più esteso di quanto ipotizzato da giustificare un deflusso sotterraneo medio di altri $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$, rimangono solo le altre due possibilità. Ma, come già detto, è difficile pensare a precipitazioni ancora maggiori (e non di poco!); prende quindi maggiore consistenza la possibilità che vi sia un errore nelle misure di portata alla stazione di Canevara.

Purtroppo non è possibile verificare questo al momento attuale,

in quanto la stazione è stata disattivata nel 1974. Si è allora cercato di saperne di più parlando con i tecnici dell'Ufficio Idrografico dell'Arno che eseguivano le misure di portata.

Si è così saputo che la stazione di Canevara non era dotata di un impianto di teleferica per la misura delle portate in condizioni di piena. Quando l'altezza dell'acqua superava il metro (corrispondente a circa 4.13 m³/s) e non era possibile fare le misure con il mulinello a guado, venivano eseguite solo misure della velocità superficiale mediante galleggianti. La velocità media nella sezione veniva poi desunta dalla curva che esprime la relazione fra la velocità media e la velocità superficiale; curva ricostruita per altezze idrometriche fino ad un metro ed estrapolata per altezze superiori.

TABELLA 8 — *Portata del Frigido misurata a Canevara e portata calcolata a partire dal bilancio relativo al bacino idrogeologico*

Anno	Portata misurata Q	Portata calcolata Q _c	Q/Q _c
1950	5.44	4.35	1.25
1951	8.74	5.71	1.53
1852	8.46	5.53	1.53
1953	3.19	2.40	1.33
1954	6.00	4.03	1.49
1955	5.92	5.33	1.11
1956	4.86	3.31	1.47
1957	5.54	4.58	1.21
1958	5.45	4.10	1.33
1959	8.07	5.68	1.42
1960	9.61	8.08	1.19
1961	4.25	4.17	1.02
1962	3.07	3.53	0.87
1963	9.83	5.40	1.82
1964	7.35	4.48	1.64
1965	10.10	5.64	1.79
1966	8.49	5.24	1.62
1967	4.08	4.00	1.02
1968	5.78	5.25	1.10
1969	5.67	4.43	1.28
1970	—	—	—
1971	5.70	4.13	1.38
1972	5.40	4.54	1.19

Essendo la portata media annua, quale risulta da quelle misure, di $6,41 \text{ m}^3/\text{s}$, è evidente che la maggior parte delle determinazioni di portata derivano dal tratto di curva estrapolata. Se tale estrapolazione non è corretta le portate desunte possono essere sbagliate; in particolare possono essere sovrastimate, tanto più quanto più alte sono in valore assoluto.

L'incertezza delle misure di portata sono state una delle cause, insieme con la riduzione del personale, che hanno indotto l'Ufficio Idrografico dell'Arno a interrompere i rilievi alla stazione di Canevara.

L'ipotesi di una sovrastima delle portate alte è supportata dal confronto fra il deflusso calcolato per il bacino idrogeologico ipotizzato e quello misurato alla stazione di Canevara (tab.8). Il rapporto tra la portata media annua misurata e la portata stimabile in base alle precipitazioni che si sono avute sul bacino idrogeologico, infatti, si discosta dall'unità tanto più quanto maggiori sono le portate misurate a Canevara (Fig.3).

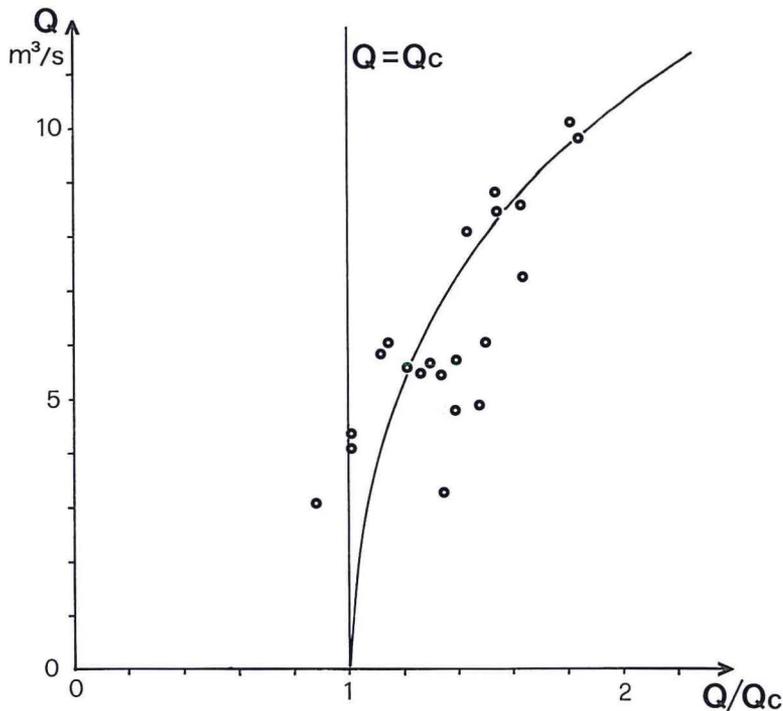


Fig. 3 - Variazione del rapporto fra deflusso misurato alla stazione di Canevara (Q) e il deflusso calcolato per il bacino idrogeologico ricostruito (Q_c) in funzione di Q .

7.7 — CONCLUSIONI

La distribuzione delle rocce permeabili per fratturazione e carsismo e di quelle a bassa permeabilità, insieme con la ricostruzione delle strutture geologiche, hanno permesso la delimitazione del bacino idrogeologico del Frigido.

Questi limiti comprendono tre aree distinte al di fuori del bacino idrografico, per complessivi 26,2 km² (il bacino idrografico sotteso dalla stazione di Canevara è di 46,7 km²).

L'appartenenza di queste aree al bacino idrogeologico del Frigido è in buona parte confermata dalle prove di colorazione ed è in ottimo accordo con le portate delle sorgenti, sia all'interno che all'esterno del bacino idrografico.

Il bilancio idrico redatto per il bacino idrogeologico, dal quale ci si attendeva una conferma dei limiti ipotizzati, ha però fornito un deflusso inferiore di 1,69 m³/s rispetto a quello che risulta negli Annali Idrologici. Questa differenza non può essere imputata a precipitazioni maggiori di quelle calcolate né ad una estensione ancora più grande del bacino idrogeologico. Nella prima ipotesi dovremmo incrementare l'altezza media annua di precipitazioni calcolata, 2644 mm, di oltre 1000 mm; nella seconda dovremmo praticamente raddoppiare l'estensione dell'area esterna al bacino idrografico rispetto ai 26,2 km² calcolati e questo non è compatibile con le portate delle sorgenti e con l'assetto idrostrutturale.

Si deve quindi concludere che il deflusso misurato a Canevara è superiore a quello effettivo, a causa della imprecisione delle misure delle portate di piena.

Per finire, il coefficiente di deflusso del Frigido (il cui valore di 1,92 riportato dagli Annali Idrologici era stato lo spunto per questo studio), già ridotto a 1,64 con una maggiore accuratezza nel calcolo degli afflussi, viene ulteriormente ridotto a 1,21 (D = 3189 mm; P = 2644 mm) in base al bilancio idrologico ricostruito per il bacino idrogeologico del Frigido.

BIBLIOGRAFIA

- AMBREGI L. (1956) - Attività del Gruppo Speleologico Fiorentino. *Boll. Notiz. Sez. Fiorentina CAI*, 1956 (1-2), Firenze.
- ANELLI F. (1959) - Nomenclatura italiana dei fenomeni carsici. *Le Grotte d'Italia*, s. 3 (II), Bologna.

- BALBIANO C. (1972) - Attuali disponibilità e possibilità dei traccianti idrologici in Speleologia. *Rass. Speleol. Ital.*, n. 24 (2), Como.
- BARBERI F., GIGLIA G. (1965) - La serie scistosa basale dell'autoctono delle Alpi Apuane. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **84** (6), 41-92.
- BOCCALETTI M., BORTOLOTTI V. (1965) - Lacune della Serie Toscana. 1. Serie stratigrafiche giurassico-eoceniche nelle zone di Roggio e Trassilico sul versante orientale delle Alpi Apuane. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **84** (5), 271-356.
- BOCCALETTI M., CAPITANI S., COLI M., FORNACE G., GOSSO G., GRANDINI G., MILANO P.F., MORATTI G., NAFISSI P., SANI F. (1983) - Caratteristiche deformative delle Alpi Apuane Settentrionali. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **26**, 527-534.
- BOCCALETTI M., GOSSO G. (1980) - Analisi della deformazione plicativa e rapporti con lo sviluppo della blastesi metamorfica nell'area Campo Cecina - Monte Pisanino delle Alpi Apuane Sett.. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **21**, 101-110.
- BONI C., BONO P. (1982) - Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace in un bacino carsico dell'Italia Centrale: confronto con analoghi bacini rappresentativi di diverse litologie. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, **17** (II), 437-452.
- BRASCHI S., DEL FREO P., TREVISAN L. (1986) - Ricostruzione degli antichi ghiacciai sulle Alpi Apuane. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Serie A*, **93**, 203-219.
- BORTOLOTTI V., PASSERINI P., SAGRI M., SESTINI G. (1970) - The Myogeosynclinal sequences. In: Development of the Northern Apennines Geosyncline. *Sedim. Geology*, **4**, (3/4), 341-344.
- CAPITANI L., SANI F. (1983) - Analisi strutturale delle aree del M. Cavallo, M. Contrario e M. Tambura. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **26**, 535-541.
- CARMIGNANI L. (1984) - Carta Geologico Strutturale del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane. Scala 1:25.000, LAC, Firenze.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. (1975) - Le fasi tettoniche terziarie dell'Autoctono delle Alpi Apuane: studio delle strutture minori della zona centro-meridionale. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **94**, 1957-1981.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. (1977) - Analisi mesostrutturale della zona occidentale delle Alpi Apuane Metamorfiche. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **96**, 429-450.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. (1979) - Large scale reverse — drug folds — in the late building of the Apuane Alps. *Atti. Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Serie A*, **86**, 109-125.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. (1983) - Il problema della doppia vergenza delle Alpi Apuane e la struttura del M. Corchia. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **26**, 515-525.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. (1984) - Autoctono Apuano e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti. *Soc. Geol. Ital.*, vol. Giubil., Ed. Pitagora, Bologna, 199-214.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G., KLIGFIELD R. (1980) - Nuovi dati sulla zona di taglio ensialico delle Alpi Apuane. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **21**, 939-1000.
- CAZZANTE S. (1987) - Significato della distribuzione delle sorgenti e calcolo dell'infiltrazione in alcune formazioni geologiche della Toscana. Tesi di laurea ined., Dip. Sc. Terra, Univ. di Firenze.
- CASTANY G. (1967) - *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris.
- CICALI F., PRANZINI G. (1984) - Idrogeologia e carsismo dei Monti della Calvana. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **103**, 3-50.

- DALLAN L., NARDI R. (1975) - Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino Settentrionale. *Mem. Acc. Lunigianese di Scienze G. Capellini*, **42**, La Spezia, 1-212.
- DE GIULI C. (1962) - Su alcune cavità carsiche dei comuni di Montemurlo e di Massa. *Ann. della Sez. Fiorentina del CAI*, Firenze, 30-45.
- DE SIO F., CHIANCONE M. (1965) - Elenco catastale delle grotte della Toscana (dal n. 184 al n. 328). Atti VI Conv. di Speleol. dell'It. Centro-Meridionale, Firenze, 206-215.
- DROGUE C. (1967) - Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques. Evaluation de la capacité de rétention pour chenaux et fissures. *Cronique d'Hydrogéologie*, n. 10, 43-47.
- FEDERICI P.R., RAU A. (1980) - Note illustrative della neotettonica del Foglio 96 - Massa. C.N.R. Prog. Fin. Geodinamica, pubbl. n. 356, 1365-1382.
- FEDERICI P.R., SPAZZAFUMO A., CASOLI G.M., STRENTA D., DINI M., PALAGI F. (1981) - Ricerche sul carsismo delle Alpi Apuane. *Studi e Ricerche di Geografia*, **1**, 86-119.
- FORTI P. (1981) - L'idrogeologia sotterranea del Monte Tambura. *Speleo*, n. 6, Firenze, 22-27.
- Geoversilia (1980) - Progetto per la ricerca delle risorse idriche e formazione della carta delle acque del territorio comunitario. Comunità Montana n. 3 — Apuo Versiliese —, Rapp. inedito.
- GIANNOTTI R., LANZA B., MARCUCCI G. (1954) - Primo elenco catastale delle grotte della Toscana. *Rass. Speleol. Ital.*, anno IV, n. 1, Como.
- GIANNOTTI R., PRELOVSEK V. (1978) - Terzo estratto dell'elenco catastale delle Grotte della Toscana (dal n. 329 al n. 600). Pubbl. della Fed. Speleol. Toscana, Firenze.
- GIGLIA G. (1967) - Geologia dell'Alta Versilia Settentrionale (tavoletta M. Altissimo). *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **6**, 67-95.
- GIGLIA G., RADICATI DI BROZOLO F. (1970) - K/Ar age of metamorphism in the Apuane Alps (Northern Tuscany). *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **89**, 485-497.
- GRASSI G. (1976) - Sulla idrogeologia del bacino del Frigido: carta delle permeabilità delle rocce e studio delle sorgenti del Frigido e del Cartaro. Tesi di laurea inedita, Ist. di Geol., Univ. di Pisa.
- KLIGFIELD R., VALLMEYER R.D., HUNZIKER J., SCHAMEL S. (1982) - Implicazioni tettoniche dell'età assoluta (K/Ar e Ar/Ar) dei metasedimenti a deformazione multipla delle Alpi Apuane. Riass. delle comunicaz. presentate al 70° Congr. della Soc. Geol. Ital., Siena.
- MAILLET E. (1905) - Essai d'hydraulique souterraine et fluviale. Herman & C., Paris.
- MARCACCINI P. (1964) - Fenomeni carsici di superficie nelle Alpi Apuane. *Riv. Geogr. Ital.*, **71**, 35-54.
- MASINI R. (1956) - Studi geoidrologici sulle acque fredde e calde (Alpi Apuane, Bacino del Serchio). *Boll. Serv. Geol. d'Ital.*, **78**, 709-788.
- MASINI R. (1958) - Il Fiume Frigido di Massa Carrara e l'anomalia del suo rendimento idrologico. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat.*, Serie A, **65**, 358-371.
- MASINI R. (1960) - I bacini costieri delle Alpi Apuane (studi geoidrologici sulle acque sotterranee). *Boll. Serv. Geol. d'Ital.*, **80**, 657-752.
- MATTEINI L. (1981) - Idrogeologia dell'Alta Val di Serchio. Tesi di laurea inedita. Dip. Sc. Terra, Univ. di Firenze.

- MEINZER D.E. (1932) - Outline of methods for estimating groundwater supply. U.S. Geological Survey, Water Supply, paper 638-c.
- MERCIAI G. (1912) - Fenomeni glaciali delle Alpi Apuane. *Atti. Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem.*, **28**, 70-90.
- NARDI R. (1963) - La zona degli scisti sopra i marmi nelle Alpi Apuane e i terreni che la costituiscono. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **82**, 505-522.
- NARDI R. (1967) - Schema stratigrafico e strutturale delle Apuane nord-orientali. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **6**, 421-437.
- PASQUINI G. (1975) - Il concetto di livello di base in regione carsica. Atti VI Conv. di Speleol. dell'It. Centro-Mer.le, Firenze 29-36.
- PASSERI L. (1976) - Porosità primaria delle rocce carbonatiche e canalizzazione freatica. *Le Grotte d'Italia*, n. 3.
- PERRONE E. (1912) - Carta Idrografica d'Italia. Corsi d'acqua del litorale toscano a N del Serchio e della Riviera Ligure. Min. Agr. Ind. e Comm., Roma.
- PEZZATI M.L., ROSSETTI R. (1986) - Il clima del Parco della Valle del Ticino. Dip. Sc. Terra, Univ. di Pavia.
- PRELOVSEK V., SALVATICI L. (1967) - Il fenomeno carsico nei pressi della Sorgente del Frigido in prov. di Massa. *Boll. Sez. Fiorentina del CAI*, 1967 (2-3), Firenze.
- PRELOVSEK V., SALVATICI L. (1969) - L'abisso Piero Saragato e il fenomeno carsico nel versante Nord del Monte Tambura. *Boll. Sez. Fiorentina del CAI*, 1969 (2-3), Firenze.
- PRELOVSEK V., UTILI F. (1973) - Il carsismo delle pendici Nord del Monte Pisanino. *Boll. Sez. Fiorentina del CAI*, 1973 (1), Firenze.
- SANI P. (1974) - Sulla idrogeologia del Bacino del Frigido: climatologia e bilancio idrologico. La piana costiera. Tesi di laurea inedita, Ist. di Geologia, Univ. di Pisa.
- SCHOELLER H. (1967) - Hydrodynamique dans le karst (écoulement et immagasinement). *Cronique d'Hydrogéologie*, n. 10, 7-21.
- SGUAZZONI G. (1981) - Carta geologica delle Alpi Apuane centro-settentrionali. Pubbl. del Centro di Studio per la Geol. dell'App., Univ. di Firenze.
- SIVELLI M., VIANELLI M. (1982) - Abissi delle Alpi Apuane. Guida Speleologica. Soc. Speleol. Ital., Bologna.
- SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA (1978) - Manuale di Speleologia. Longanesi & C., Milano.
- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R. (1957) - Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centerton.
- TONGIORGI E., TREVISAN L. (1940) - Aspetti glaciali e forestali delle Alpi Apuane durante l'ultima glaciazione. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Proc. Verb.*, **49** (3), Pisa, 3-10.
- TONINI D. (1966) - Elementi di Idrografia e Idrologia (parte II). Libr. Univ., Venezia.
- TROMBE F. (1969) - Les eaux souterraines. Presses Universitaires de France, Paris.
- TURC L. (1954) - Le bilan de l'eau: relation entre les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement. La Houille Blanche, 3 journées de l'hydraulique de la Soc. Hydr. de France, Paris, 36-44.

UFFICIO IDROGRAFICO DELL'ARNO (1950-1972) - Annali Idrologici dei bacini dell'Arno e limitrofi. Serv. Idrogr. Ital., Min. Agr. Ind. e Comm., Roma.

ZACCAGNA D. (1925) - Sulla correlazione idrologica tra il Canale del Forno e quello di Resceto (Massa). *Mem. Acc. Lunigianese di Sc. G. Capellini*, anno VI, f. III, La Spezia.

ZACCAGNA D. (1932) - Le Alpi Apuane. *Mem. Descr. della Carta geologica d'Italia*, v. 25, Roma.

(*ms. pres. il 2 giugno 1989; ult. bozze il 12 dicembre 1989*)