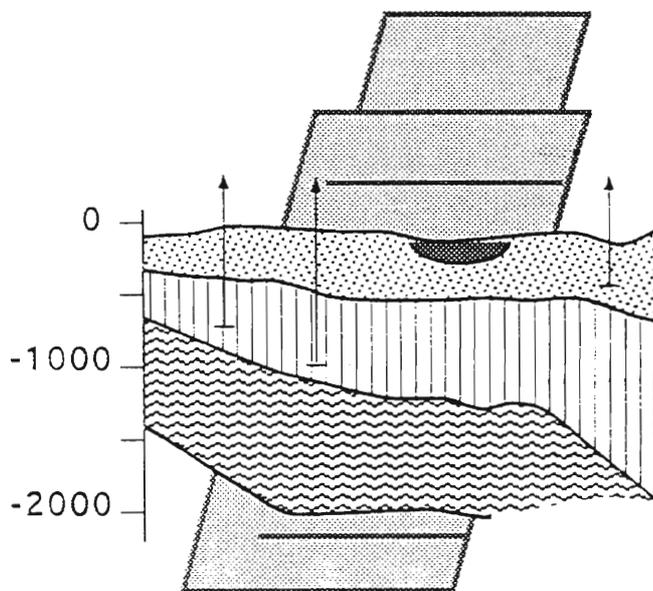


INVENTARIO DELLE RISORSE GEOTERMICHE NAZIONALI

ENEL S.p.A. DPT / VDAG
ENI-AGIP SERG
CNR IIRG
ENEA AMB / ANV

VALUTAZIONE DI DETTAGLIO DELLE STRUTTURE PROFONDE NELLA PIANURA DEL FIUME ARNO NELLA PROVINCIA DI PISA



RAPPORTO

A cura di:

Bellani S., Grassi S., Squarci P.

Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Pisa.

Per la parte idrogeologica, ha collaborato Rossi S.

Università di Pisa.

Elaborazioni Grafiche

Gori L. - IIRG

CNR - Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche - Pisa

GENNAIO 1994

MINISTERO DELL'INDUSTRIA, DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO

Legge 9 Dicembre 1986, n.896

" Disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche "

INVENTARIO DELLE RISORSE GEOTERMICHE NAZIONALI

ENEL S.p.A. DPT / VDAG
ENI-AGIP SERG
CNR IIRG
ENEA AMB / ANV

**Valutazione di dettaglio delle strutture
profonde nella pianura del fiume Arno
nella provincia di Pisa.**

Rapporto

A cura di:

Bellani S., Grassi S., Squarci P.

Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Pisa.

Per la parte idrogeologica ha collaborato **Rossi S.**

Università di Pisa.

Elaborazioni Grafiche

Gori L. - IIRG

CNR - Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche - Pisa

GENNAIO 1994

Indice

1 - Introduzione	Pag. 1
2 - Inquadramento geologico - strutturale	Pag. 1
3 - Inquadramento idrogeologico	Pag. 4
3-1) Analisi delle deformazioni fragili delle formazioni carbonatiche mesozoiche	Pag. 5
4 - Inquadramento geochimico delle acque termali	Pag. 6
4-1) Sistemi idrotermali	Pag. 6
4-2) Acque di pianura	Pag. 7
5 - Dati termometrici del sottosuolo	Pag. 8
5-1) Pozzi a profondità medio - piccola	Pag. 8
5-2) Pozzi profondi	Pag. 9
6 - Stima delle temperature al tetto dei carbonati	Pag. 10
7 - Considerazioni sulle strutture più favorevoli al reperimento di fluidi termali	Pag. 12
8 - Conclusioni	Pag. 12
9 - Bibliografia	Pag. 15

Allegati : 32 Figure

1 Tabella

4 Tavole fuori testo

1 - Introduzione:

Nella prima fase di attuazione dell'Inventario delle Risorse Geotermiche (Legge 896 del 9/12/1986 "Disciplina della ricerca e della coltivazione delle risorse geotermiche"), utilizzando i dati disponibili al 1988 venne eseguita una prima valutazione delle caratteristiche geotermiche del territorio nazionale (Convenzione ENEL - ENI/AGIP - CNR - ENEA, 1988).

Tra le aree indiziate per il reperimento di fluidi a media temperatura a profondità inferiori ai 1000 metri, venne segnalata l'area della pianura del fiume Arno in provincia di Pisa, con particolare riferimento alla zona racchiusa tra il fiume stesso a Nord, i Monti Pisani ad Est, le dune sabbiose della pianura costiera tra Pisa e Livorno ad Ovest, e le colline pisano-livornesi a Sud. Qui, infatti, veniva ipotizzata la presenza di un potenziale serbatoio entro 2000 m di profondità, con temperature comprese tra 60 e 90 °C. Questa prima valutazione, congiuntamente ad altre di carattere socio-economico, per la presenza di potenziali utenti nel campo del teleriscaldamento, degli usi industriali ed agricoli, hanno portato alla presentazione di un programma di indagini di dettaglio su quest'area. Scopo principale dello studio è stata:

- la definizione dell'andamento delle strutture geologiche sepolte al di sotto dei sedimenti Neogenici e Quaternari presenti;
- la definizione della natura del substrato dei sedimenti Neogenici per valutare la possibilità della presenza, al suo interno, di un acquifero;
- la stima delle temperature dei fluidi presenti.

Questo, per definire gli obiettivi minerari, e passare alla fase di esplorazione con perforazioni di media

profondità. Il lavoro ha comportato la raccolta e revisione dei dati geologici e strutturali esistenti in letteratura (Ghelardoni et al., 1968; Bortolotti, 1966; Giannini e Nardi, 1965, 1966; Rau e Tongiorgi, 1974; Bernini et al., 1990; Mazzanti, 1994) negli archivi dell'IIRG-CNR e del MICA; la raccolta, la revisione e l'interpretazione dei dati stratigrafici e termici di sondaggi perforati per altri scopi da vari Enti e Compagnie (AGIP, ex Larderello, ENEL, CNR-IIRG). Sono stati elaborati dati sismici (Ghelardoni et al., 1968; Mariani e Prato, 1988) e gravimetrici (Dati inediti ENEL-VDAG, Pisa 1993) per la realizzazione di un modello strutturale in grado di definire in maniera attendibile le profondità delle formazioni che possono costituire un acquifero termale utilizzabile. Sono stati impiegati i dati termici esistenti, raccolti nelle varie indagini nei pozzi per ricerca di idrocarburi (AGIP-MICA) ed altri rilevati in pozzi per ricerche di acqua (Boccaletti et al., 1977). Sono stati inoltre eseguiti, espressamente per questa ricerca, tre pozzi termometrici della profondità di 100 m per eseguire misure di gradiente geotermico (e di flusso di calore), ubicati in posizione strategica per la valutazione di aree con caratteristiche strutturali di particolare interesse dove sarebbero prevedibili, se la ricerca avesse esito positivo, possibili utilizzazioni.

2 - Inquadramento geologico - strutturale

L'area che è stata presa in considerazione in questa ricerca (Tav. 1) è caratterizzata da una complessa situazione geologica da un punto di vista sia stratigrafico che strutturale, sulla quale vari autori (Ghelardoni et al., 1968; Giannini e Nardi, 1966; Rau e Tongiorgi, 1974; Mariani e Prato, 1988; Mazzanti, 1994) hanno, anche

recentemente, eseguito studi di dettaglio e di carattere regionale.

Si tratta di una vasta area pianeggiante, corrispondente alla pianura alluvionale dei fiumi Arno e Serchio, dalla quale emergono a Nord-Est i Monti Pisani, a Sud i Monti Livornesi ed i rilievi delle basse colline tra Guasticce e Ponsacco. Questi rilievi, che costituiscono il margine orientale dell'ampio graben pisano-versiliese, riempito di notevoli spessori di depositi neoautoctoni, formano un complesso edificio strutturale, caratterizzato dalla sovrapposizione dell'Unità della Falda Toscana sull'Unità Toscana metamorfica. Questa Unità metamorfica, contraddistinta da un metamorfismo in facies di Scisti Verdi, comprende una successione che inizia con depositi clastici di ambiente continentale, che vanno dal Paleozoico al Trias, costituiti da scisti, filladi e quarziti (Verrucano). A questi fa seguito una copertura prevalentemente carbonatica rappresentata da Grezzoni (Norico), Calcarea ceroidale (Lias inf.) e Calcarea selcifera (Lias m.-Dogger). La successione prosegue con Marne a Posidonomia (Dogger) e Diaspri (Malm), per concludersi con depositi terrigeni costituiti dalla Scaglia (Cretaceo - Eocene) e dallo Pseudomacigno (Oligocene med.-sup.). L'Unità della Falda Toscana, in cui manca buona parte della successione carbonatica e marnosa del Mesozoico, presente invece nei Monti d'Oltre Serchio, è rappresentata dal Calcarea cavernoso (Trias), dai Diaspri (Malm) e dalla Maiolica (Cretaceo inf.) La maggior parte del rilievo è costituita da affioramenti delle formazioni metamorfiche, come mostrato in Tav. 1. A Sud-Est della direttrice Pisa-Lucca, fino alle pendici meridionali del Monte Pisano, predominano le formazioni filladico-quarzitiche paleozoico-triassiche. A Nord-Ovest del suddetto allineamento, lungo un'ampia fascia che

si estende dalla zona di S. Giuliano sino al margine settentrionale del massiccio, affiora il complesso carbonatico metamorfico mesozoico, cui si sovrappone la copertura cretaceo-eocenica costituita da depositi prevalentemente terrigeni. I terreni della Falda Toscana si rinvencono nella zona nord-occidentale del rilievo e sono rappresentati, in maggior parte, da affioramenti di Calcarea cavernoso del Trias. Nei Monti Livornesi affiorano formazioni in facies di flysch cretaceo-eocenico con ofioliti, sormontate dalla serie neogenico-quadernaria.

Quest'ultima, che affiora dal margine orientale dei Monti Livornesi fino a Pontedera, si sviluppa a partire dal Messiniano (Miocene sup.) con conglomerati a matrice sabbioso-marnosa, talora con piccole lenti lignitifere. Lo spessore della formazione si aggira attorno ai 50 m. In concordanza con i conglomerati, seguono marne e marne argillose con una potenza di circa 200 m. A queste seguono banchi di gesso cristallino e gesso detritico per uno spessore di alcune decine di m. Al di sopra ancora, con uno spessore di circa 200 m, giacciono, in leggera discordanza angolare, strati di arenarie e conglomerati, di ambiente "lago-mare". In concordanza col Miocene terminale si trova il Pliocene, costituito da argille con intercalazioni di sabbie e calcareniti, con uno spessore che in superficie può essere stimato attorno ai 1000 m. Trasgressive sulle formazioni precedenti, si incontrano formazioni di sabbie ed argille, con rari strati di calcareniti e ciottoli nella parte basale (Pleistocene inf.). A queste seguono formazioni costituite da ghiaie, sabbie e tufiti marno-sabbiose del Pleistocene medio-superiore. Questi sedimenti sono poi ricoperti da depositi alluvionali, talora terrazzati (Olocene-Attuale). La pianura di Pisa, delimitata verso mare da una fascia di dune costiere larga 5-6

km, è costituita in superficie da depositi alluvionali limo-argillosi del Serchio e dell'Arno (Pleistocene sup.-Attuale). Notizie sull'assetto strutturale e sulla successione litostratigrafica presente al di sotto di questi depositi, si hanno da studi geofisici e da perforazioni profonde eseguite sia in passato che in tempi recenti per ricerca di idrocarburi (Ghelardoni et al., 1968; Mariani e Prato, 1988; Mazzanti, 1994, etc.). Di particolare interesse sono i dati di Mariani e Prato (1988), (Tavv. 2 e 3; fig.1) che forniscono un quadro geologico-strutturale aggiornato della parte occidentale della pianura pisana. La correlazione tra dati sismici e di perforazione consente di definire l'andamento del bacino neogenico che caratterizza la fascia costiera. Questo bacino si estende a Sud fino a Livorno, ed a Nord verso l'offshore ligure. Come gli adiacenti bacini dell'Era, dell'Elsa e del Fine, si è sviluppato dal Miocene sup. fino al Pleistocene. Il bacino si orienta circa in direzione NNW-SSE, regolato da una serie di faglie dirette che dislocano a varie quote il substrato pre-miocenico costituito dalle arenarie oligoceniche ("Macigno") della Serie Toscana nella parte ribassata della struttura verso Ovest (pozzo Tombolo 1, fig. 2), e, ad Est, dai calcari mesozoici (pozzi Poggio 1 e Pontedera 1, figg. 3 e 4) o dalla "Scaglia" della Serie Toscana (pozzo Zannone 1, fig. 5). I dati di quest'ultimo pozzo sono stati reinterpretati espressamente attraverso lo studio dei cuttings e delle carote fornite dall'ENEL, che ha consentito una migliore definizione dell'assetto strutturale di una vasta area confinante con questo pozzo, limitando verso Sud l'estensione, direttamente al di sotto del Neogene, delle Unità metamorfiche toscane affioranti a Nord dell'Arno che, nella stratigrafia originale, erano state confuse con la formazione della "Scaglia" e con intercalazioni di breccie sedimentarie.

Questi litotipi sono stati riconosciuti in affioramento come appartenenti alla Serie Toscana non metamorfica (Dallan, 1966; Patacca, 1973). I dati di sottosuolo permettono di riconoscere che la successione neogenico-quaternaria ha il suo massimo sviluppo nel margine costiero, più ribassato, ed è costituita da una serie messiniana clastica con uno spessore di circa 300 m, una serie pliocenica inferiore prevalentemente sabbiosa con uno spessore di 1100 m, una serie pliocenica medio-superiore argilloso sabbiosa di circa 400 m, ed infine una serie pleistocenica di 700 m. L'assetto strutturale del substrato dei sedimenti neogenici è rappresentato nella Tav. 2 e nelle sezioni geologiche di Tav. 3. Come osservato da altri autori (Bernini et al., 1990; Mariani e Prato, 1988), queste aree sono caratterizzate da una diffusa tettonica estensionale, la cui evoluzione nello spazio e nel tempo è legata alla formazione del bacino tirrenico (Boccaletti e Guazzone, 1972; Giglia, 1974). Anche in questo caso, si riscontra la presenza di una "master-fault" con rigetto verticale di quasi 1500 m, posta sul margine orientale del bacino neogenico costiero immediatamente ad Ovest di Pisa, e di fasci di faglie antitetiche localizzate sul suo margine opposto, situato ad Ovest della linea di costa, a circa 10 km di distanza (Mariani e Prato, 1988). Un'altra importante dislocazione, sempre a carattere distensivo, con rigetto superiore ai 500 m è presente ai piedi del margine occidentale dei Monti Pisani, tra le località di S. Giuliano T., Uliveto T. e Cascina. Recenti studi (D'Amato-Avanzi e Nardi, 1993) che hanno individuato depositi costieri pliocenici in affioramento a quota 150-160 m s.l.m. sui Monti d'Oltre Serchio, fanno valutare il rigetto complessivo della faglia nell'ordine dei 700 m. Altro elemento strutturale importante dell'area in esame è la lineazione Livorno-Sillaro

(Bortolotti, 1966), che delimita verso Sud il bacino in questione. Successivamente ad una serie di eventi tettonici che si sviluppano tra il Messiniano ed il Pliocene sup., che hanno portato all'apertura dei vari bacini e a trasgressioni e regressioni, un evento di subsidenza tettonica molto importante, all'inizio del Pleistocene (a partire da circa 1.6 Ma fa) ha portato all'assetto attuale, con i sedimenti pleistocenici trasgressivi sia sull'area occupata dal bacino costiero che verso l'interno, fino ai Monti Pisani e a parti più interne del bacino dell'Arno. Questi sedimenti si trovano talora trasgressivi direttamente sulle formazioni mesozoiche della Serie Toscana, o su lembi residui della serie pliocenica.

3 - Inquadramento idrogeologico

L'analisi delle caratteristiche litologiche delle formazioni presenti nell'area in studio, sia in affioramento che nel sottosuolo, unitamente alla valutazione degli eventi tettonici che le hanno interessate, portano alla formulazione di un modello idrogeologico così strutturato, a partire dai livelli geometricamente più bassi (Tav. 2):

1) Complesso a bassa permeabilità costituito dalle formazioni filladico-quarzitiche del "Basamento" paleozoico-triassico (affiorante sui Monti Pisani). Questo costituisce il livello di base della circolazione regionale.

2) Al di sopra, formazioni carbonatiche mesozoiche delle Unità metamorfiche e della Falda Toscana, caratterizzate da intensa fratturazione che, talora associata a fenomeni di dissoluzione carsica, risulta spesso orientata secondo direzioni preferenziali come descritto in dettaglio alla fine del paragrafo. Queste formazioni nel loro insieme costituiscono l'acquifero principale dell'area in esame, che si estende anche a gran parte della regione circostante.

3) Al tetto delle formazioni carbonatico-metamorfiche della Falda Toscana è presente un Complesso terrigeno a medio-bassa permeabilità, costituito da Unità appartenenti al Complesso metamorfico ed alla Falda Toscana (Macigno, Pseudomacigno, Scaglia).

4) Complesso costituito da argilliti prevalenti, calcari e calcari marnosi con ofioliti giurassiche (Flysch alloctoni liguri cretaceo-eocenici), presenti in affioramento nei Monti Livornesi, ma non incontrati dai sondaggi eseguiti nelle aree della pianura pisana. L'insieme è praticamente impermeabile ad eccezione delle ofioliti, che possono avere media permeabilità per fratturazione.

5) Segue la serie neogenica, caratterizzata da conglomerati, calcari organogeni, marne e gessi (Miocene sup.) con permeabilità alta nei livelli clastici grossolani e nei gessi.

6-7) Un complesso argilloso-sabbioso plio-pleistocenico, praticamente impermeabile, dove prevalgono le argille (6), con permeabilità medio-alta in corrispondenza dei livelli sabbioso-ghiaiosi(7). Le argille del complesso (6) costituiscono livelli praticamente impermeabili, mentre le sabbie e le ghiaie (7) plio-pleistoceniche ad esse intercalate, o presenti nella parte più alta della serie pleistocenica, possono costituire "orizzonti-serbatoio" per possibili accumuli di idrocarburi (metano), o acquiferi multi-strato nelle parti più superficiali (0-300 m dal p.c.)

8) In prossimità dell'emergenza delle sorgenti termali di Casciana Terme sono presenti travertini di età pleistocenico-olocenica molto permeabili ma che, date le dimensioni degli affioramenti, non hanno influenza sulla circolazione idrica importante.

9) Depositi alluvionali generalmente limo-argillosi, talora sabbiosi, che costituiscono la copertura superficiale dei sistemi geologici presenti nell'area.

3 - 1 Analisi delle deformazioni fragili delle formazioni carbonatiche mesozoiche

Qui di seguito vengono riportati i risultati dell'analisi delle deformazioni fragili che interessano le formazioni carbonatiche mesozoiche. (Grassi et al., 1992). Questa analisi è stata condotta sfruttando le ottime esposizioni offerte dalle numerose cave presenti nell'area di S. Giuliano Terme. I dati sono stati raccolti in sei stazioni di misura e quindi elaborati statisticamente per un loro confronto con i lineamenti riconosciuti sulle foto aeree. Le rocce metamorfiche affioranti nell'area analizzata sono caratterizzate da una evoluzione strutturale polifasica duttile associata ad un metamorfismo di basso grado in facies di Scisti Verdi. Tutte le deformazioni fragili osservate sono posteriori a questa evoluzione strutturale duttile i cui elementi sono sempre ben riconoscibili sul terreno. Nelle cave è stato possibile riconoscere due tipi di discontinuità strutturali relative alla deformazione fragile: faglie dirette e "joints". Le faglie, marcate da limitati spessori di fasce cataclastiche, spesso evolvono verso la superficie in fratture beanti su cui si impostano delle cavità carsiche con sviluppo di depositi di alabastriti calcaree. Solo raramente è stato possibile riconoscere delle strie sulle superfici di faglia, che hanno comunque sempre evidenziato che si tratta di faglie dirette. Non è stato possibile calcolare il rigetto di queste faglie che, dall'evidenza geologica, risulta però di ridotta entità. In tutte le stazioni di misura le faglie risultano sub-verticali come in fig. 6, ed hanno andamento meridiano con due direzioni più rappresentate: N150E e N180E. Il massimo relativo coincide comunque con la prima direzione, che risulta parallela al limite tra il rilievo e la pianura. I "joints", anch'essi sempre ben evidenti all'affioramento, si presentano

come sistemi di fratture senza alcun spostamento relativo osservabile, quasi sempre giustapposte e caratterizzate da una spaziatura generalmente superiore ad 1.5-3 m. I "joints" presentano due direzioni principali, una circa meridiana ed una diretta NW-SE con valori assai variabili dell'immersione che oscilla da 40° a 90°, sempre con direzione W. I rapporti di sovrapposizione indicano che le faglie dirette sono posteriori ai vari sistemi di "joints". Sia le faglie dirette che i "joints" non possono essere datati nell'area in esame dato che mancano sedimenti recenti. In una frattura beante connessa probabilmente con le faglie dirette, Rau e Tongiorgi (1974) hanno però riconosciuto sedimenti contenenti probabili Briozoi della famiglia Aetidae del Pliocene. I dati strutturali raccolti sul terreno sono stati quindi confrontati con i lineamenti riconosciuti sulle foto aeree a scala 1:18000 che riguardano un'area molto più vasta di quella in cui è stata condotta l'analisi mesostrutturale. I lineamenti individuati su foto aerea sono stati digitalizzati e successivamente elaborati statisticamente per meglio evidenziare le massime frequenze. Sono state così messe in evidenza due direzioni principali, in buon accordo con quelle delle faglie dirette, come da fig.7. L'elaborazione statistica dei lineamenti ha messo in evidenza anche un massimo relativo attorno alla direzione NE-SW che l'analisi mesostrutturale delle deformazioni fragili non ha segnalato. Si tratta, molto probabilmente, di lineamenti legati alle deformazioni duttili o, in alternativa, alle deformazioni fragili concentrati in particolari settori al di fuori delle stazioni di misura dove sono stati raccolti gli elementi strutturali. Rau e Tongiorgi (1974) segnalano, al di fuori dell'area studiata, faglie dirette con direzione antiappenninica, probabilmente da ricollegare con il

massimo relativo evidenziato dall'analisi delle foto aeree. Le caratteristiche sopradescritte mettono in evidenza formazioni acquifere idrogeologicamente anisotrope, con sistemi di fratture pressoché parallele al margine del rilievo, in cui le faglie dirette giocano un ruolo fondamentale nello sviluppo della circolazione idrica (Fig. 6bis). Questa considerazione è da tenere presente anche per quello che si riferisce alle strutture carbonatiche sepolte. I sistemi di faglie messi in evidenza dalla sismica (Mariani e Prato, 1988) hanno andamento meridiano, parallelo a quello messo in evidenza dalle osservazioni di superficie. E' ragionevole attendersi una forte anisotropia nella distribuzione della permeabilità nei carbonati mesozoici: di questo si dovrà tenere conto nella programmazione delle eventuali perforazioni esplorative. Qualora si dovessero eseguire perforazioni deviate, come sembrerebbe opportuno per avere una maggiore probabilità di intercettare piani di frattura subverticali (per distanziare i fondi-pozzo di eventuali "doppietti"), l'azimuth di deviazione dovrebbe avere un valore tale da consentire di mantenersi ortogonali alla direzione delle lineazioni principali (che, come sopra ricordato, sono N150E e N180E).

4 - Inquadramento geochimico delle acque termali

4 - 1 Sistemi idrotermali

Ai margini dell'area di studio si trovano tre sistemi idrotermali: S.Giuliano Terme, Uliveto Terme e Casciana Terme. Tutti e tre questi sistemi sono ubicati nei pressi di affioramenti carbonatici mesozoici, che fanno parte dell'acquifero regionale della Toscana. Le temperature all'emergenza variano fra i 23 di Uliveto ed i 40 °C circa di S.Giuliano, mentre le salinità sono

comprese fra 1.2 e 2.8 g/l rispettivamente di Uliveto e Casciana Terme, come mostra la tabella 1 in cui sono riportate le caratteristiche termiche, chimiche ed isotopiche dei vari punti d'acqua. I dati di tabella si riferiscono a singoli campionamenti per i pozzi di Casciana ed Uliveto, mentre per S.Giuliano Terme essi rappresentano valori medi relativi a tredici campionamenti delle sorgenti termali, eseguiti durante lo studio di dettaglio del sistema. Le acque di S.Giuliano e di Casciana hanno composizione decisamente Ca-SO₄, mentre quelle di Uliveto sono di tipo Ca-Mg/HCO₃ con contenuti in Cl e SO₄ praticamente equivalenti. Le acque di Casciana Terme, che rappresentano il termine più maturo, e quelle di S.Giuliano sono entrambe caratterizzate da contenuti in tritio prossimo all'errore analitico (± 1 U.T). Risultano inoltre da sature a soprassature rispetto a calcite, dolomite e prossime alla saturazione in anidrite, minerali tipici della serie evaporitica della Falda Toscana. Evidentemente esse derivano da circolazioni caratterizzate da lunghi tempi di residenza entro porzioni sepolte della serie anidritica triassica. Le acque di Uliveto, che sono caratterizzate da un modesto grado di interazione acqua roccia e da elevati contenuti di tritio, possono derivare da rapide circolazioni entro le formazioni carbonatiche localmente affioranti, oppure rappresentare una miscela di una modesta frazione di acqua termale, forse simile a quella degli altri due sistemi, e di un'acqua superficiale. La componente superficiale potrebbe provenire ai pozzi di Uliveto dagli acquiferi clastici della pianura, le cui acque risultano spesso ricche in Cl. Secondo i dati di tabella, infatti, il Cl, più abbondante nelle acque di Uliveto ricche in HCO₃ ed in tritio, sembra avere un'origine superficiale

diminuendo all'aumento della concentrazione in SO_4 e della salinità totale, e alla riduzione del contenuto isotopico dei fluidi.

Per la stima delle temperature profonde abbiamo applicato il metodo basato sul calcolo dell'indice di saturazione di vari minerali (Arnorsson 1982, Michard and Roekens 1983) ai fluidi più concentrati di S.Giuliano e di Casciana Terme, tralasciando quelli di Uliveto per le considerazioni precedenti.

L'indice di saturazione (SI) alle diverse temperature è il logaritmo del rapporto fra il prodotto di attività del minerale di interesse e la costante di equilibrio della sua reazione di idrolisi. Riportando su diagramma gli indici di saturazione del minerale in funzione della temperatura, si ottiene una curva. La temperatura di equilibrio è raggiunta quando questa curva interseca l'asse delle temperature per $\text{SI}=0$.

Applicando il codice di calcolo SOLMIN88 (Kharaka et al., 1989) abbiamo calcolato l'indice di saturazione delle acque anzidette nell'intervallo di temperatura 40-110 °C rispetto a quarzo, anidrite, calcite e smectiti di Mg, Na e di K. Questi minerali sono stati trovati in un campione di fango depositato nella cisterna della sorgente di Levante a S.Giuliano. Per applicare il metodo SI sono stati utilizzati i dati di campagna di alcalinità e pH. I valori di alluminio monomero utilizzati sono 0,0023 e 0,0043 mg/l, rispettivamente misurati a S. Giuliano e a Casciana Terme.

La figura 8, che riporta i risultati ottenuti, indica temperature di equilibrio comprese fra i 70 e 85 °C per S. Giuliano e 65-80 °C per Casciana Terme. Tali valori potrebbero rappresentare sia le temperature di un acquifero termale regionale, sia quelle di locali serbatoi di fluidi caldi.

Nel caso si ammetta la presenza di consistenti contributi ai sistemi in questione dal circuito regionale, risulta

però difficilmente comprensibile il basso contenuto in Cl osservato nelle acque più concentrate. In un pozzo AGIP perforato a Pontedera (AGIP, 1972) vengono, infatti, segnalati contenuti in Na-Cl di 49 g/l a profondità di circa 750 m, in corrispondenza delle formazioni carbonatiche mesozoiche.

4 - 2 Acque di pianura

Nella zona di Pisa a Nord dell'Arno sono documentate (Dini, 1976; Fancelli, 1987; Rossi, 1993) acque a bassa termalità con temperature di 23-24 °C circolanti in acquiferi clastici della pianura. L'origine di queste acque è stata spesso collegata a circolazioni provenienti dal sistema idrotermale di S. Giuliano Terme che, situato al piede del Monte Pisano, si trova a circa 7 km a Nord della città. Utilizzando i dati di letteratura, si è cercato di verificare l'esistenza di relazioni fra i fluidi termali ricchi in solfato di S.Giuliano e le acque degli acquiferi della piana di Pisa.

La salinità delle acque degli acquiferi clastici è compresa fra 0.7 e 2.9 g/l, mentre la loro composizione varia da Ca-Mg/ HCO_3 a Na-Ca/ HCO_3 -Cl e Na-Ca/Cl- HCO_3 . Come mostra la figura 9, la salinità è massima in corrispondenza dei pozzi più superficiali, mentre in quelli profondi assume valori intermedi. Il contenuto in SO_4 , che è generalmente modesto (<40 mg/l) nella maggior parte delle acque, diventa significativo solo lungo una fascia che, situata ad Ovest della città, si estende da S a N dell'Arno, raggiungendo localmente concentrazioni superiori a 500 mg/l.

Il SO_4 , unico anione che sembra aumentare con la profondità (fig. 10) e che non deriva da intrusione marina (fig.11), è praticamente assente nella zona nord della città, fatta eccezione per due pozzi che fanno parte della fascia anzidetta.

Nel diagramma triangolare di fig. 12 sono riportati i punti rappresentativi delle varie acque considerate, comprese quelle dei sistemi idrotermali di S. Giuliano e Casciana Terme. Dall'esame di figura risulta che le acque a componente solfatica della pianura possono rappresentare prodotti di un miscelamento di acque tipo quelle dei sistemi idrotermali con acque della piana la cui composizione anionica è regolata da HCO_3 e Cl. Le acque a bassa termalita' di Pisa (opportunamente segnalate in figura), che potrebbero costituire il possibile "end-member" del miscelamento anzidetto sono ben poco influenzate dalla circolazione solfatica essendo praticamente prive di SO_4 .

Ammesso che non si verificano significativi fenomeni di riduzione dei solfati negli acquiferi della pianura a Nord di Pisa, limitati sembrerebbero i rapporti fra i fluidi termali di S. Giuliano e le acque ipotermiche della zona settentrionale della città che, come suggerisce anche il diagramma di Ludwig-Langelier di figura 13, sembrerebbero più verosimilmente locali prodotti del miscelamento di fluidi degli acquiferi clastici della pianura.

Riguardo alle acque a componente solfatica nella pianura ad ovest della città, è da segnalare che esse caratterizzano pozzi localizzati in corrispondenza di un'importante dislocazione tettonica del substrato. Dato che in tale zona il pacco dei terreni di copertura (neogenici e pleistocenici) dovrebbe raggiungere spessori superiori ai 1000 m, è difficile pensare a contributi provenienti dalla circolazione idrica nella serie carbonatico-evaporitica mesozoica. Questa ipotesi non può comunque essere esclusa a priori, considerato che nell'area in questione non sono segnalati livelli gessiferi nei depositi recenti. È difficile poter comprendere, con i pochi dati a disposizione, l'origine di questi fluidi,

che a nostro avviso meritano indagini più approfondite.

Analisi chimiche di dettaglio ed analisi isotopiche estese possibilmente ad una rete più fitta di pozzi potranno meglio chiarire l'origine e le caratteristiche delle acque della pianura Pisana fornendo utili contributi anche al miglioramento delle conoscenze sullo stato termico dell'area.

5 - Dati termometrici del sottosuolo:

Per una caratterizzazione termica del sottosuolo, mediante misure di temperatura in pozzo, è stato possibile usufruire di pozzi appartenenti a due ben distinte categorie: 1) pozzi a profondità medio-piccola (fino a 250 m), alcuni dei quali perforati ad hoc per questa indagine; 2) pozzi per idrocarburi (profondità fino a 3000 m), perforati in tempi passati dall'AGIP e da altri Enti interessati all'esplorazione mineraria.

5 - 1 Pozzi a profondità medio-piccola:

a) Pozzo Pisa (stabilimento Saint Gobain-Pisa): profondità 100 m; la litologia attraversata è composta nei primi 30 m da sabbie ed argille alluvionali; i rimanenti 70 m da argille sabbiose di ambiente lagunare. Il dato termico disponibile (Boccaletti et al., 1977) consiste in un valore del gradiente di $61.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, misurato tra 30 e 100 m.

b) Pozzo Monte Pisano (Calci): profondità 240 m, litologia attraversata costituita interamente da terreni del basamento metamorfico, prevalentemente filladi e quarziti. Sono disponibili log termici di dettaglio eseguiti dall'IIRG negli anni '80, con un valore di poco superiore ai $21 \text{ }^\circ\text{C}$ a fondo pozzo (240 m), ed un gradiente medio tra 40 e 240 m di $24 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (fig. 14).

c) Pozzo Via Don Bosco (Pisa): profondità 117 m, con litologia composta da sabbie, ghiaie, argille di origine alluvionale e di laguna in alternanza tra loro. Log termici di dettaglio sono stati eseguiti dall'IIRG, con una temperatura misurata (non completamente stabilizzata) di circa 23 °C a fondo pozzo. Il gradiente termico medio tra 20 e 115 m è di 62 °C/km (fig. 15).

d) Pozzo Area di Ricerca CNR (Pisa): profondità 105 m, litologia costituita da argille prevalenti nei primi 50 m, da sabbie e sabbie argillose nel tratto rimanente. Questo sondaggio è stato perforato espressamente per questa indagine. Sono stati eseguiti log termici di dettaglio ripetuti nel tempo fino alla stabilizzazione del pozzo. La temperatura a fondo pozzo è di 21.1 °C. Il gradiente medio tra 20 e 100 m è di 55 °C/km (figg. 16, 17 e 17bis).

e) Pozzo La Rotta (Pontedera): profondità 100 m, litologia costituita da alternanze di argille, ghiaie, sabbie, con prevalenza di sabbie. Anche questo sondaggio è stato perforato ad hoc per questa indagine. Log termici di dettaglio sono stati ripetuti fino alla completa stabilizzazione del pozzo. La temperatura a fondo pozzo è di 17.7 °C. Il gradiente medio tra 40 e 100 m è di 43.5 °C/km (figg. 18, 19 e 19bis).

f) Pozzo Casa Pinzale (loc. Arnaccio): profondità: 100 m; litologia costituita da alternanze di argille, ghiaie, sabbie, con prevalenza di sabbie. Anche questo sondaggio è stato fatto eseguire dall'IIRG espressamente per questa indagine. Log termici di dettaglio sono stati ripetuti fino alla stabilizzazione del pozzo. La temperatura a fondo pozzo è di 21.2 °C; il gradiente medio tra 20 e 100 m è di 54 °C/km (figg. 20, 21 e 21bis).

Alcune interessanti osservazioni sullo stato termico del sottosuolo della pianura di Pisa possono essere fatte

utilizzando i valori di temperatura delle acque emunte da pozzi in essa perforati. Si è osservato, infatti, un aumento della temperatura delle acque all'approfondirsi delle falde da cui esse provengono. Utilizzando i pozzi per i quali si conosceva con buona approssimazione la profondità della falda, si è ricostruita la sezione con isoterme di Tav. 4. Si può osservare che la distribuzione delle temperature ben si inquadra con i dati rilevati nel pozzo Area di Ricerca CNR (cfr. fig. 17 e 17bis) e che i valori di temperatura rilevati nelle falde più profonde sono coerenti con una distribuzione di temperatura di tipo "conduttivo", fino alla profondità di oltre 200 m. Questo consente di avere, con un buon grado di attendibilità, la conoscenza della distribuzione delle temperature a profondità superiori alla quota di - 100 m raggiunta con il sondaggio termometrico CNR. L'inflessione delle isoterme che si nota in corrispondenza delle aree di S. Piero a Grado e Coltano è da mettersi in relazione con la presenza di vasti affioramenti di sabbie di duna che costituiscono locali aree di assorbimento di acque meteoriche, che vanno a ricaricare gli acquiferi sottostanti (Trevisan e Tongiorgi, 1953; Fancelli et al., 1986).

5 - 2 Pozzi profondi:

a) Pozzo Monte Nevoso 1D (ubicato nella fascia costiera tra Pisa e Livorno, così come i pozzi Tombolo 1, 2D e 3): si tratta di una perforazione eseguita dall'AGIP; la profondità raggiunta è di 2300 m. Da un punto di vista litologico, si sono attraversati potenti pacchi di sedimenti argilloso-sabbiosi plio-pleistocenici. Misure di temperatura non stabilizzate di 52 °C a 1250 m, e di 76 °C a 2000 m, consentono di stimare temperature di 58 °C a 1000 m e di 103

°C a 2000 m (stime eseguite dall'IIRG) (fig. 22).

b) Pozzo Tombolo 1: perforazione AGIP, che ha raggiunto i 3000 m di profondità.

Litologia: sedimenti argilloso-sabbiosi plio-pleistocenici fino a 2200 m, quindi 300 m di sedimenti argilloso-arenacei miocenici, e da 2500 m a fondo pozzo arenaria ("Macigno"), tipica della parte sommitale della Serie Toscana, di età Oligocene sup. - Miocene inf.. Sono disponibili temperature (non stabilizzate) di 86 °C a 2200 m, e di 120 °C a 3000 m. Le T stimate (dati IIRG) sono: 58 °C a 1000 m, 97 °C a 2000 m, 125 °C a 3000 m (fig. 2).

c) Pozzo Tombolo 2D: perforazione AGIP, profondità raggiunta 2350 m. Litologia: sedimenti argillosi, sabbiosi ed arenacei, di età Miocene sup. - Pleistocene. Le T misurate stabilizzate sono di circa 80 °C a 1500 m. Le T stimate (dati IIRG) sono: 61 °C a 1000 m, 105 °C a 2000 m, 139 °C a 3000 m (fig. 23).

d) Pozzo Tombolo 3: perforazione AGIP, profondità 1820 m. Litologia composta da potenti depositi argilloso-sabbiosi che occupano tutto il Pliocene, giungendo fino al Pleistocene. Un dato di T (stabilizzata) indica 92 °C a fondo pozzo: le T stimate dall'IIRG sono di 57 °C a 1000 m e di 100 °C a 2000 m (fig. 24).

e) Pozzo Pontedera 1 (Pontedera) : pozzo eseguito dall'AGIP; profondità 780 m. Fino a 730 m si incontrano depositi alluvionali pliocenici; da 730 m a fondo pozzo, calcari della Serie Toscana di età Retico-Hettangiano. La temperatura misurata (non stabilizzata), è di 30 °C a fondo pozzo; la T stimata è di 45 °C al tetto dei calcari (730 m) (fig. 4).

f) Pozzo Pontetetto (Lucca) : perforato dalla Soc. Larderello; la profondità è di 985 m: i primi 385 m sono costituiti da depositi alluvionali pleistocenici, separati tramite un sottile livello di

conglomerati dal susseguente pacco di 300 m di anidriti triassiche. Da 720 m a fondo pozzo si incontrano dapprima arenarie, quindi scisti e quarziti, tutti litotipi appartenenti al "Verrucano s.l.". Sono disponibili temperature misurate non stabilizzate di 35 °C a 500 m e 42 °C a fondo pozzo; le T stimate (dati IIRG), sono: 40 °C a 500 m e 52 °C a fondo pozzo (fig. 25).

6 - Stima delle temperature al tetto dei carbonati (sondaggi IIRG):

Una valutazione di dettaglio delle temperature che si ipotizzano al tetto della serie carbonatica sede di potenziali serbatoi geotermici è stata eseguita per i tre sondaggi curati direttamente dall'IIRG. La metodologia utilizzata è quella proposta da Bullard (1939), basata sull'equazione:

$$T_z = T_0 + q_0 \sum_{i=1}^N (\Delta_{z_i} / \lambda_i), \text{ dove } T_z$$

rappresenta la T alla profondità z, T₀ è la T media annua superficiale del luogo, q₀ è il flusso di calore, supposto costante, Δ_{z_i} è lo spessore della formazione i-esima, e λ_i rappresenta la conducibilità termica della formazione stessa. L'ipotesi di fondo è che ci si trovi sempre in presenza di un regime di flusso conduttivo e costante lungo la verticale. In ogni caso, i pozzi sono stati approntati in modo tale da eliminare, o comunque minimizzare, gli effetti degli acquiferi, mediante cementazione completa del foro dopo l'inserimento di una tubazione da 2" sigillata e colma d'acqua, nella quale le misure di temperatura possono essere ripetute sempre nelle medesime condizioni.

1) Pozzo La Rotta (Pontedera) (fig. 26): Oltre ai log termici completi lungo tutto il pozzo, ripetuti nel tempo, sono state eseguite misure di conducibilità termica con sonda Shotherm QTM su tre campioni, prelevati a varie profondità; i

valori ottenuti sono: 1.40 W/mK in corrispondenza di argille sabbiose fossilifere (36-43 m); 1.76 W/mK (sabbie con ghiaia: 55-60 m); 2.07 W/mK nelle sabbie grossolane che si incontrano a fondo pozzo. I gradienti corrispondenti alle varie quote di campionamento mostrano una buona correlazione inversa rispetto alla conducibilità termica: il valore medio del flusso di calore che si ricava considerando conducibilità e gradienti nel tratto 40-100 m è di 74.5 mW/m². Se il tratto 0-20 m viene comunque sempre escluso in questo genere di calcoli, poiché risente delle oscillazioni termiche stagionali, in questo caso non si sono considerati i dati fino a 40 m di profondità poiché, dall'andamento della curva del gradiente, si è evidenziato un disturbo paragonabile a quello di una zona di ricarica interessata da movimenti idrici (Smith & Chapman, 1983).

Sulla base di questo dato, e della profondità del tetto della serie carbonatica, rinvenuta nel pozzo Pontedera 1 ad una profondità di circa 750 m, si è applicato il metodo di Bullard per valutare la temperatura prevista a tale profondità: il valore ottenuto è di 45.5 °C.

2) Pozzo Casa Pinzale (loc. Arnaccio) (fig.27):

Anche in questo caso, sono state eseguite misure di conducibilità termica con sonda Shotherm QTM su tre campioni, con i seguenti risultati: 1.01 W/mK in argille limose (10-19 m); 1.73 W/mK in ghiaie con sabbia grossolana (57-73 m); 1.70 W/mK nel tratto terminale del pozzo, in sabbie con limo e ghiaie (75-100 m). I gradienti nei tratti corrispondenti ai campionamenti sono ben rispondenti alla conducibilità termica misurata. Il valore medio del flusso di calore che si ricava lungo tutto il pozzo (considerando i gradienti al di

sotto dei 20 m di profondità) è di 77 mW/m².

La temperatura al tetto della serie carbonatica, supposta a 700 m di profondità, è stata stimata, con il metodo di Bullard, in 49 °C.

3) Pozzo Area di Ricerca CNR (Pisa) (fig. 28)

Le misure di conducibilità sono state eseguite su tre campioni, con questi risultati: 1.13 W/mK in argilla limosa (40-51 m); 2.04 W/mK in sabbia fossilifera (61-67 m); 2.20 W/mK in sabbia fine (100-105 m).

I gradienti, anche in questo caso, corrispondono piuttosto fedelmente alla conducibilità termica misurata. Il valore medio di flusso lungo tutto il pozzo (con i gradienti al di sotto dei 20 m di profondità) è di poco superiore agli 82 mW/m².

Non esistono pozzi profondi nelle immediate vicinanze di questo sondaggio, tuttavia la profondità dell'orizzonte carbonatico è stata stimata, mediante modello gravimetrico, in circa 850 m. Da sezioni sismiche in prossimità dell'area interessata si è riusciti a stimare gli spessori delle varie formazioni plio-pleistoceniche che costituiscono la copertura della serie carbonatica, e a valutare, per confronto, la loro conducibilità termica. Applicando quindi il metodo di Bullard, la temperatura stimata al tetto dei carbonati è di 60.5 °C.

Utilizzando tutti i dati strutturali e termici disponibili si sono realizzate tre sezioni, (Tav. 3) con un tentativo di ricostruzione, con isoterme, dello stato termico del sottosuolo. Si può notare che nella copertura argilloso-sabbiosa si ha una distribuzione di temperatura che sembra essere legata ad una trasmissione di calore essenzialmente per conduzione. In corrispondenza del gradino sollevato della struttura, dove i carbonati maggiormente conduttivi si

avvicinano alla superficie, nella copertura sovrastante si ha un sollevamento delle isoterme; nel bacino i 60 °C si hanno attorno agli 800 m, mentre al di sopra dei carbonati sollevati si hanno a 700 m. Questa distribuzione risulta dall'applicazione di un modello esclusivamente conduttivo all'interno della struttura carbonatica (entro la quale non abbiamo dati diretti). Questa condizione, per quanto si riferisce alle temperature al tetto dei carbonati, porta a valutazioni generalmente sottostimate nei confronti di quelle che si potrebbero avere con l'applicazione di un modello che preveda anche la convezione.

7 - Considerazioni sulle strutture più favorevoli al reperimento di fluidi termali

Le formazioni carbonatiche che affiorano sul margine occidentale del Monte Pisano, nella zona di S. Giuliano Terme, vengono bruscamente ribassate dalla già citata faglia ad ampio rigetto verticale (~ 700 m) che borda il suddetto margine (Tav. 2). Nella pianura dove sorge la città di Pisa, ed in un'ampia zona a Sud di essa, fino alle colline Pisano-Livornesi, si viene così ad avere una coltre (fino a ~ 1000 m sul margine occidentale) di sedimenti pleistocenici direttamente poggianti sulle successioni carbonatiche mesozoiche della Serie Toscana. La "master fault" con rigetto verticale prossimo ai 1500 m che borda ad Est il bacino neogenico costiero porta rapidamente i carbonati a profondità superiori ai 3000 m, come verificato nel pozzo Tombolo 1, che a tale quota incontrava ancora le formazioni arenacee che sovrastano quelle carbonatiche nella serie. Considerando imprescindibile la presenza di un'estesa serie carbonatica quale potenziale serbatoio geotermico a profondità non superiori ai 1500 - 2000 m (e non

inferiori ai 700 - 900 m), per il reperimento di fluidi termali con caratteristiche adatte ad uno sfruttamento per applicazioni di bassa entalpia, appare evidente come l'area racchiusa tra le due faglie principali sopra ricordate (entrambe con andamento NNW-SSE) sia indicata per ulteriori indagini, anche con perforazioni esplorative profonde. In particolare, un'ampia area a Sud della città di Pisa (dove è ubicato il pozzo "Poggio 1"), rappresenta una culminazione del tetto dei carbonati, che sono stati incontrati, intensamente fratturati, poco sotto i 700 m; le caratteristiche di anomalia termica di questa zona sono piuttosto sviluppate, come verificato nel vicino sondaggio Pinzale. Anche l'area orientale della città di Pisa, in corrispondenza della quale il tetto dell'orizzonte carbonatico è supposto essere attorno agli 850 m, ha evidenziato una discreta anomalia termica, senza trascurare l'estrema vicinanza del sistema termale di S. Giuliano Terme, dove i carbonati si ritrovano in affioramento e dove esistono sorgenti con acqua con temperatura prossima ai 40 °C.

8 - Conclusioni

L'esame congiunto degli elementi strutturali, idrogeologici e termici disponibili per l'area della pianura dell'Arno in provincia di Pisa, consentono di fissare alcuni obiettivi per lo sviluppo della ricerca con perforazioni esplorative profonde. In tav. 2 è data una sintesi strutturale dell'area, basata su dati geofisici (sismica e gravimetria) e di perforazioni profonde. Nella zona contraddistinta con tonalità grigia, le isolinee descrivono il tetto delle formazioni carbonatiche mesozoiche con profondità tra 500 e 1000 m. Queste formazioni, per le loro caratteristiche di

permeabilità, possono costituire un serbatoio, e le temperature previste nella sua parte superiore sono dell'ordine di 40 - 60 °C. All'interno di quest'area si segnalano, in particolare, le zone della periferia della città di Pisa, ivi compresa l'Area di Ricerca del CNR (pozzo CNR), dove è prevedibile il rinvenimento di fluidi con temperatura di 60 - 70 °C, alla profondità di 800 - 1000 m. Un'altra area è quella dell'Arnaccio, dove nel sottosuolo è presente, all'intorno del pozzo Poggio, un'ampia struttura carbonatica sollevata (700 m al culmine), estesa per circa 30 km². Qui, il pozzo anzidetto mise in evidenza una forte permeabilità al tetto dei carbonati. La conoscenza della distribuzione della temperatura in profondità nelle formazioni della copertura neogenico-pleistocenica nell'adiacente fossa tettonica, congiuntamente alle misure di flusso di calore immediatamente ad Est della culminazione della struttura, consentono di prevedere al tetto del serbatoio carbonatico una temperatura di 60 °C. Lo studio dei sistemi idrotermali affioranti ai margini dell'area (S. Giuliano T., Uliveto T., Bagni di Casciana) mostra che, almeno in prossimità di queste emergenze, sono presenti fluidi a bassa salinità totale (~ 3 g/l). Scarse sono le conoscenze sulle aree distanti dalle emergenze termali. Non si hanno elementi certi per poter stabilire se le acque marine plio-pleistoceniche, che senz'altro avevano saturato i carbonati sottostanti, siano state sostituite dalle acque dolci piovane della circolazione regionale. Nella struttura carbonatica incontrata dal pozzo Pontedera 1 furono campionate acque ad alto contenuto di NaCl (49 g/l) (AGIP, 1972), e non è da escludere che simili salamoie possano ancora saturare gran parte delle strutture sepolte sotto la copertura dei sedimenti marini plio-pleistocenici. Anche di questo si dovrà tenere conto nella valutazione della

fattibilità di progetti di utilizzazione di queste acque. Per quanto si riferisce alla permeabilità delle formazioni presenti al di sotto della copertura plio-pleistocenica si deve osservare che si hanno informazioni dirette soltanto attraverso due pozzi profondi (Poggio 1 e Pontedera 1): in questi, le formazioni carbonatiche mesozoiche presentavano indizi di buona permeabilità. E' difficile poter estrapolare questi dati al resto delle strutture rigide sepolte, e più difficile ancora è poter stabilire nei dettagli la natura stessa delle formazioni al di sotto della copertura sedimentaria recente. Non si può escludere la presenza, in alcune zone limitate, delle parti alte della Serie Toscana ("Macigno" e/o "Scaglia"), scarsamente permeabili. Questa situazione è stata evidenziata dallo studio che abbiamo condotto sulla stratigrafia del pozzo Zannone. Nonostante queste limitazioni, gli elementi che abbiamo a disposizione e che abbiamo con attenzione valutato in questo studio rendono ragionevole proseguire ricerche che prevedano anche importanti impegni finanziari. Per concludere, nell'area della pianura dell'Arno in provincia di Pisa esistono le condizioni per passare alla fase esplorativa profonda per la realizzazione di progetti di utilizzazione di acque a media temperatura (60 - 70 °C) per:

- riscaldamento di ambienti
- serricoltura
- piscicoltura
- altri usi del calore nell'agricoltura e nell'industria.

Le modalità di realizzazione potrebbero essere quelle classiche del "doppietto", con la realizzazione di un pozzo di estrazione, e di uno di reiniezione. Una prima valutazione delle condizioni esistenti nel sottosuolo, date le caratteristiche dell'intervento che prevede la reiniezione dei fluidi estratti praticamente a ciclo chiuso, porta a concludere che un progetto di

utilizzazione delle acque termali profonde sia compatibile con le esigenze di tutela ambientale, per la mancanza di fenomeni di subsidenza e di inquinamento degli acquiferi superficiali o profondi. Effetti benefici in campo ambientale, inoltre, si potrebbero ottenere in quanto una utilizzazione del calore geotermico, in sostituzione dell'uso di combustibili fossili, consente la riduzione dell'immissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera.

9 - Bibliografia

- Arnorsson S., Sigurdsson S., H. Svavarson (1982) - The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0 to 370°C. *Geochim. Cosmoch. Acta*, vol. 46. pp. 1513-1532.
- Bernini M., Boccaletti M., Moratti G., Papani G., Sani F., Torelli L. (1990) - Episodi compressivi neogenico-quaternari nell'area estensionale tirrenica Nord-Orientale. Dati in mare e a terra. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 45, pp. 577-589.
- Boccaletti M., Guazzone G. (1972) - Gli archi appenninici, il Mar Ligure ed il Tirreno nel quadro della tettonica dei bacini marginali di retro-arco. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 11, pp. 201-216.
- Boccaletti M., Fazzuoli M., Loddo M., Mongelli F. (1977) - Heat-flow measurements on the Northern Apennine arc. *Tectonophysics*, vol. 41, pp. 101-112.
- Bullard E.C. (1939) - Heat flow in South Africa. *Proc. Roy. Soc. London A*, vol. 173, pp. 474-502.
- Dallan L. (1966) - Le microfacies dei ciottoli del conglomerato presente nella "Scaglia toscana" in alcuni affioramenti della Val di Serchio (Prov. di Lucca). *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 5 n. 4.
- D'Amato Avanzi G., Nardi I. (1993) - Indizi di neotettonica nei Monti d'Oltre Serchio: faglie distensive recenti al bordo della Pianura Pisana e depositi ciottolosi a quota 170 metri. *Boll. Soc. geol. it.*, vol. 112, pp. 601-614.
- Fancelli R., Grifoni Cremonesi R., Mazzanti R., Menchelli S., Nencini C., Pasquinucci M., Tozzi C. (1986) - Evoluzione della Pianura di Pisa. In: "Terre e paduli", Pontedera, pp. 25-39.
- Fancelli R. (1987) - Piana di Pisa: Localizzazione dei siti per lo sfruttamento delle acque ipotermiche. CNR-PFE, 2° Sem. Informativo Attività Ricerca Promosse Progetti Esecutivi 1984-1986. Ferrara, 1987, SI-5, pp. 629-638.
- Giannini E., Nardi R. (1965) - Geologia della zona Nord-Occidentale del Monte Pisano e dei Monti d'Oltre Serchio. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 74 n. 5.
- Giannini E., Nardi R. (1966) - Osservazioni sulla stratigrafia e la tettonica della zona di raccordo tra il Monte Pisano e le Alpi Apuane. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 84, n. 5, pp. 417-437.
- Giglia G. (1974) - L'insieme Corsica-Sardegna e i suoi rapporti con l'Appennino Settentrionale: rassegna di dati cronologici e strutturali. In: "Paleogeografia del Terziario sardo nell'ambito del Mediterraneo occidentale". *Rend. Sem. Fac. Sci. Univ. Cagliari*, pp. 245-272.
- Grassi S., Carosi R., Marroni M., Ancora D. (1992) - Il sistema idrotermale di S. Giuliano Terme (PI): note di geologia, idrogeologia e geochemica. *Boll. Soc. geol. it.*, vol. 111, pp. 303-313.
- Kharaka Y.K., Gunter W.D., Aggarwal P.K., Perkins E.H., DeBraal J.D. (1989) - Solmineq.88: a computer program for geochemical modelling of water-rock interactions. *U.S. Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Report 88-4227*.
- Mariani M., Prato R. (1988) - I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismico-stratigrafico. *Atti 74° Congr. Naz. Soc. geol. it.*, Sorrento 1988, vol. A, pp. 371-374.
- Mazzanti R. (1994) - La pianura di Pisa e i rilievi contermini: la natura e la storia. *Mem. Soc. geogr. it.*, vol. 50, 491 pp.

Michard G., Roekens F. (1983) - Modelling of the chemical composition of alkaline hot waters. *Geothermics*, vol. 12, pp. 161-169.

Patacca E. (1973) - Microfacies dei conglomerati della "Scaglia" e del "Macigno" di alcune serie toscane. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 12, n. 2, pp. 187-226.

Rau A., Tongiorgi M. (1974) - Geologia dei Monti Pisani a Sud-Est della Valle del Guappero. *Boll. Mem. Soc. geol. it.*, vol. 13, n. 3 pp. 227-408.

Rossi S. (1993) - Studio idrogeologico e idrochimico dell'area compresa tra il fiume Serchio e lo scolmatore dell'Arno, con particolare riguardo al fenomeno dell'intrusione marina. Tesi di Laurea. Univ. Pisa.

Smith L., Chapman D.S. (1983) - On the thermal effects of groundwater flow. I. Regional scale systems. *J. Geophys. Res.*, vol. 88, n. B1, pp. 593-608.

Trevisan L., Tongiorgi E. (1953) - Le acque del sottosuolo della Pianura Pisana. *La Provincia pisana*, 9/10, pp. 4.

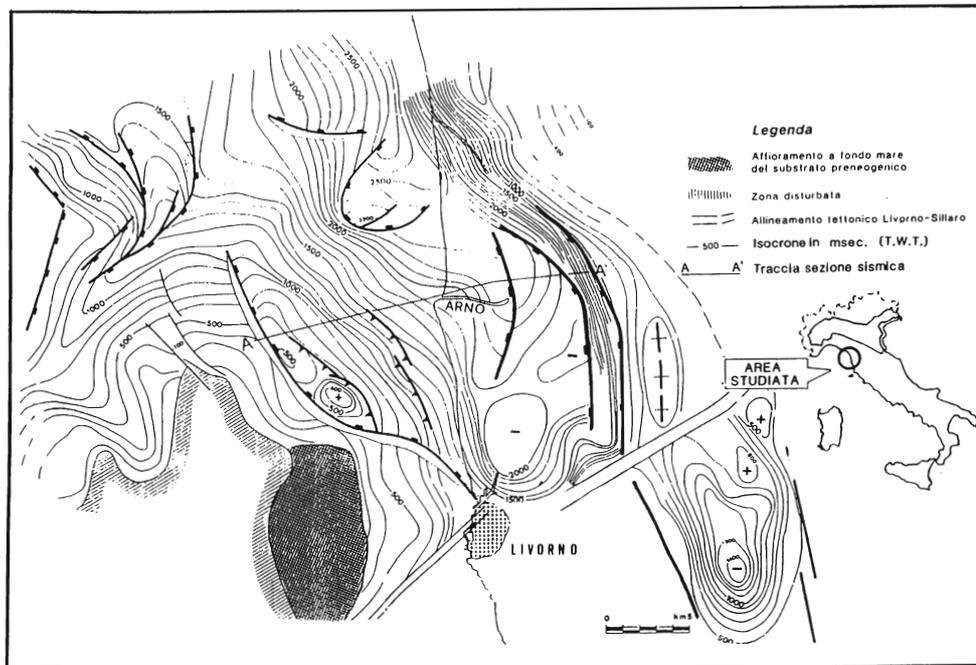


Fig. 1 - Bacino dell'Arno: isocrone della base della serie neogenica. (da: Mariani e Prato, 1988)

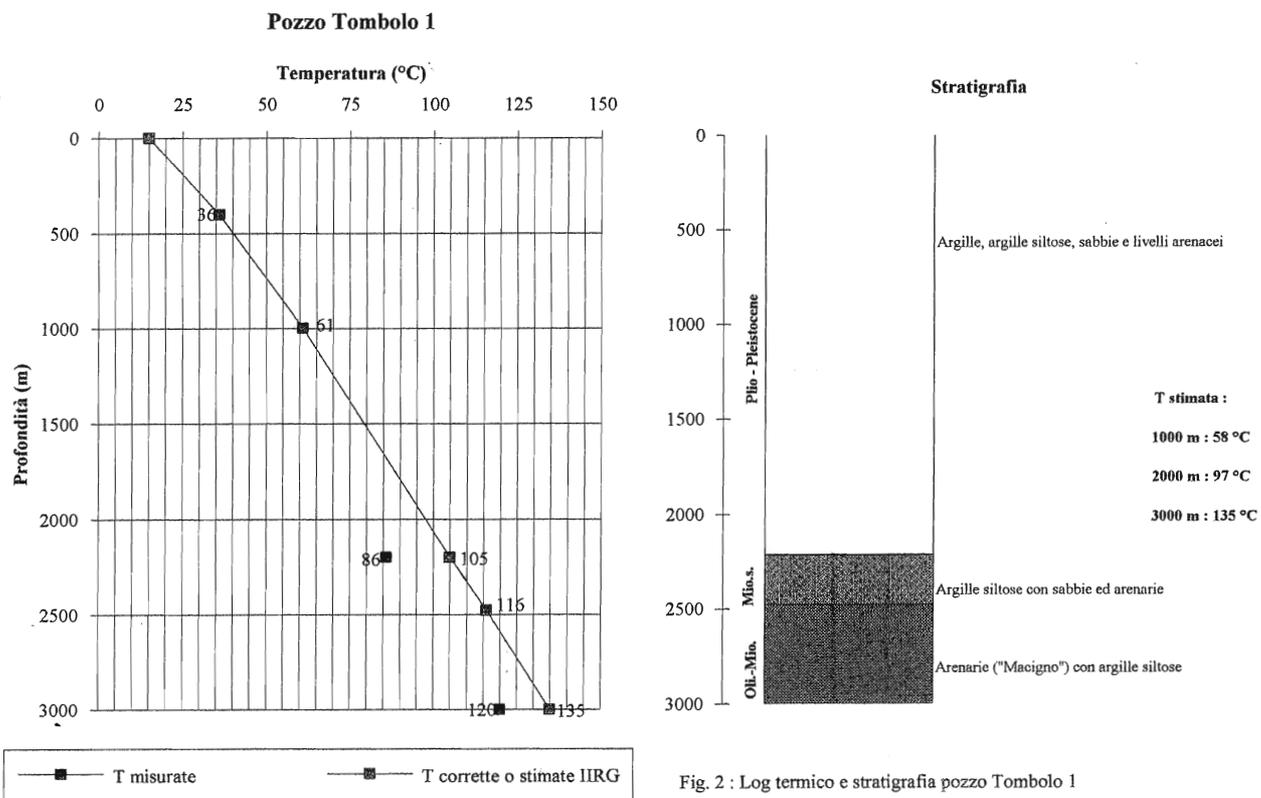


Fig. 2 : Log termico e stratigrafia pozzo Tombolo 1

Pozzo Poggio 1

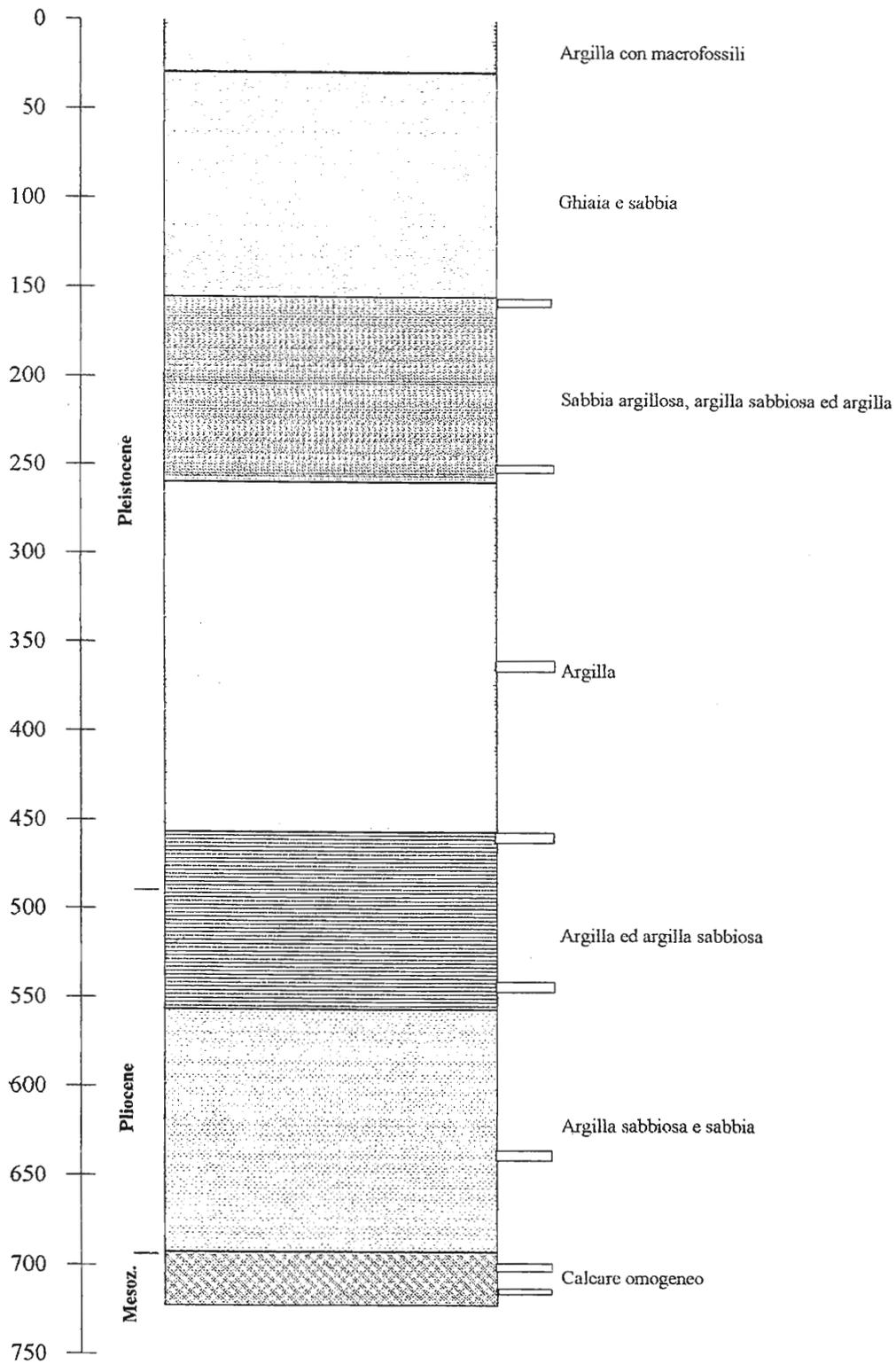


Fig. 3 : Stratigrafia pozzo Poggio 1

□ carotaggio

Pozzo Pontedera 1

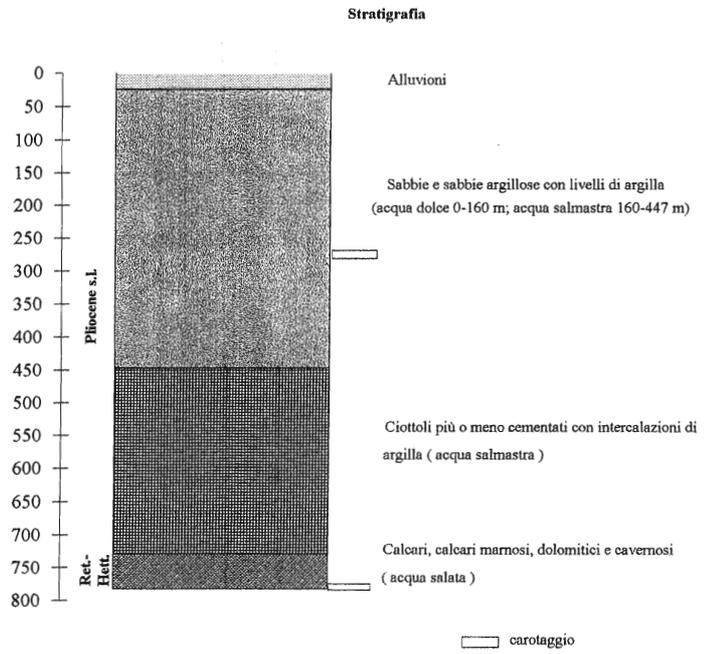
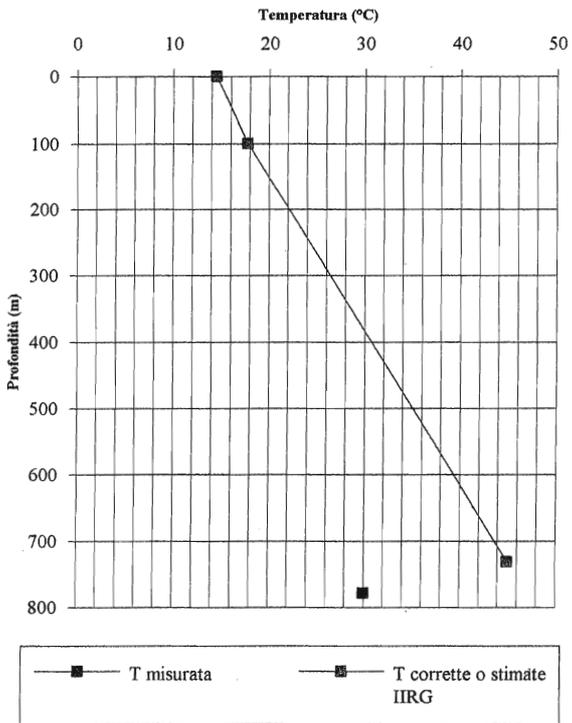


Fig. 4 : Log termico e stratigrafia pozzo Pontedera 1

Pozzo Zannone 1

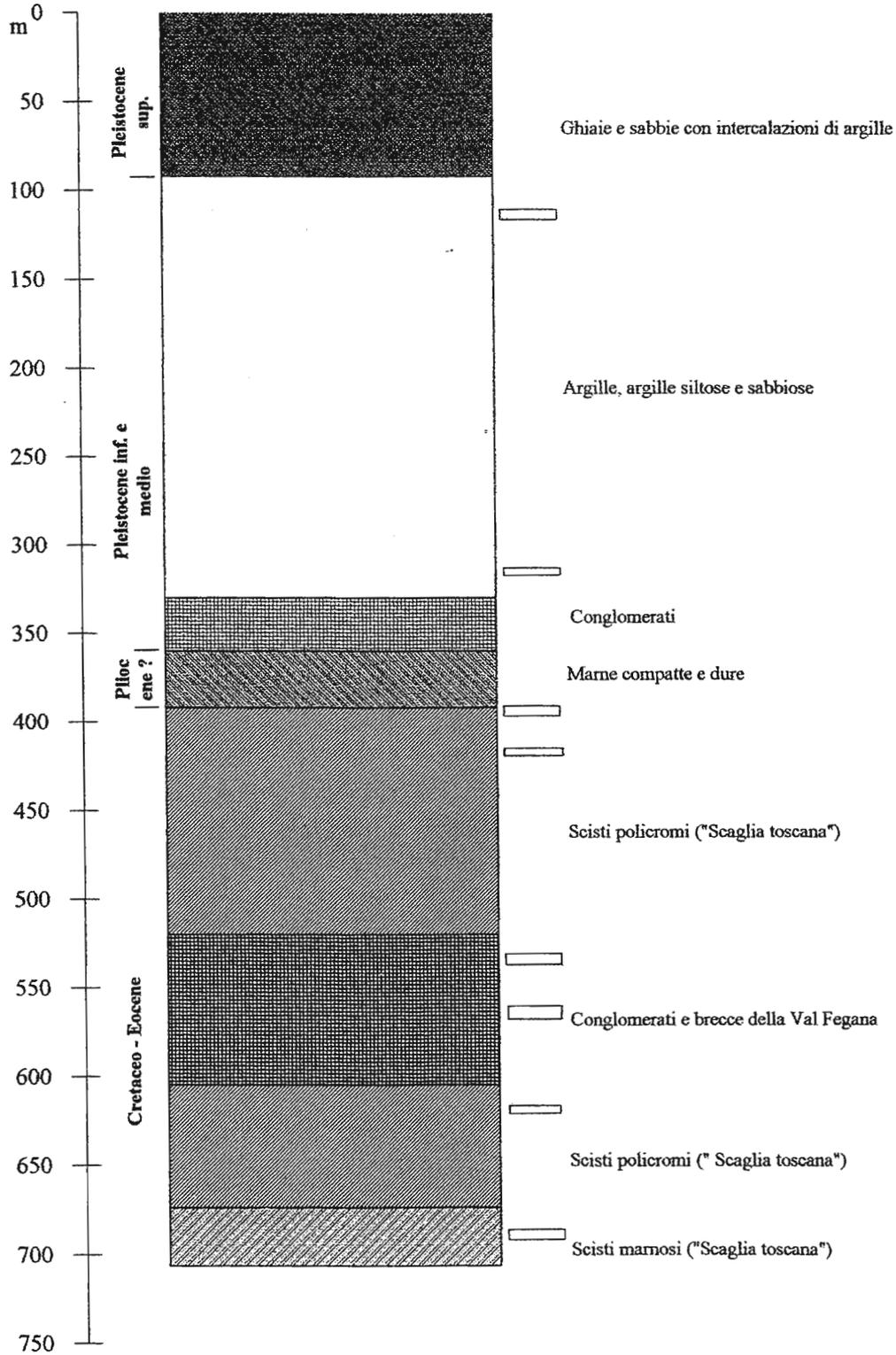


Fig. 5 : Stratigrafia riveduta pozzo Zannone 1

□ carotaggio

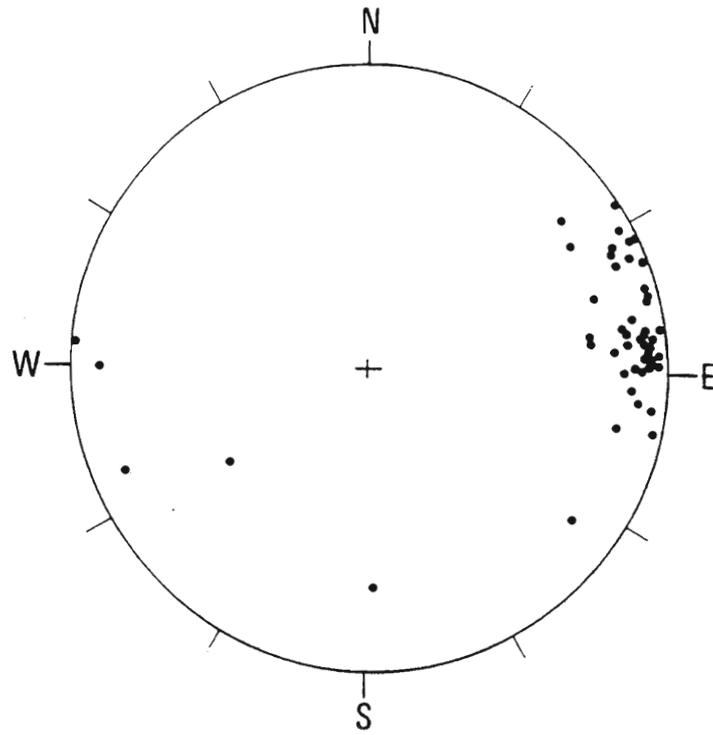


Fig. 6 - Diagramma della distribuzione dei poli delle faglie dirette. Proiezione di Schmidt, emisfero inferiore.
 (da: Grassi et al., 1992)

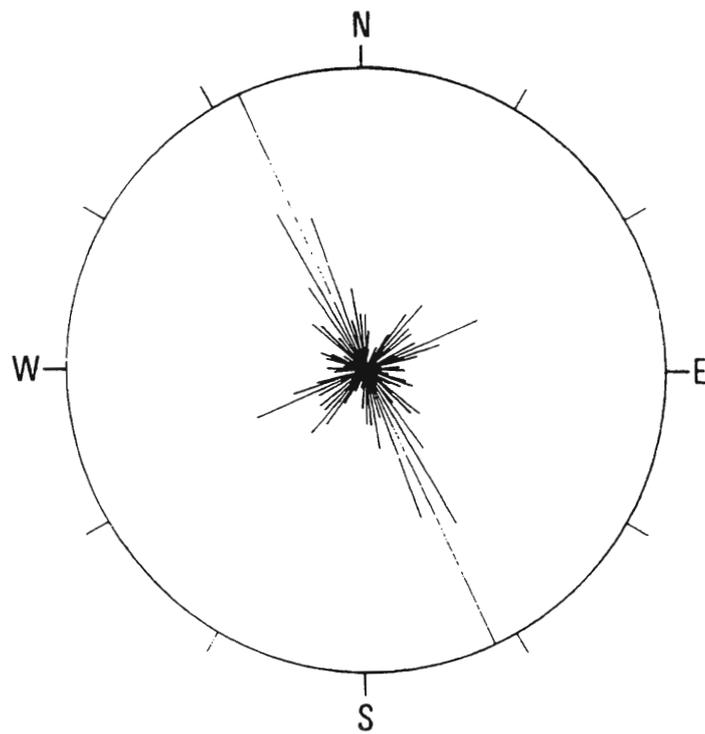


Fig. 7 - Diagramma a rosa dei lineamenti individuati da foto aeree. (da: Grassi et al., 1992)



Fig. 6 bis - La fotografia mostra la frattura beante all'interno della stazione di sollevamento della sorgente Caldaccoli (S. Giuliano Terme). La larghezza della frattura è intorno ai 20 cm.

Sistema	Punto d'acqua	Data	T°C	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	So4	H3BO3	SIO2	TDS	δO 18	Tritio
Uliveto	pozzo 3	febb.89	23	6,7	266	36	138	12,2	817,4	139	186	6,8	14,2	1615,6	-6,29	14,8
Uliveto	pozzo 4	febb.89	24	6	216	29	89,4	8,5	633,18	94,2	127	4,5	11,7	1213,48	-6,32	13,2
Casciana	pozzo 3	apr. 92	36	6,8	671	129	31,7	3,3	248,88	27,9	1680	2,86	18,8	2813,44	-6,81	1,2
Casciana	pozzo 4	apr. 92	35,6	7,4	621	125	35,8	3,15	259,86	28,1	1670	2,86	18,6	2764,37	-6,81	1,1
S.Giullano	sorg. Levante	1988/91	39,1	7,1	499	81	85,6	5,3	421,6	94	1124	2,6	27	2340,1	-6,54	1,6
S.Giullano	sorg. Ponente	1988/91	36,3	6,9	471	78	71,9	5,1	397	83	1043	2,3	25	2176,3	-6,56	2,3

Tabella 1 - Caratteristiche termiche, chimiche ed isotopiche dei vari punti d'acqua termali.

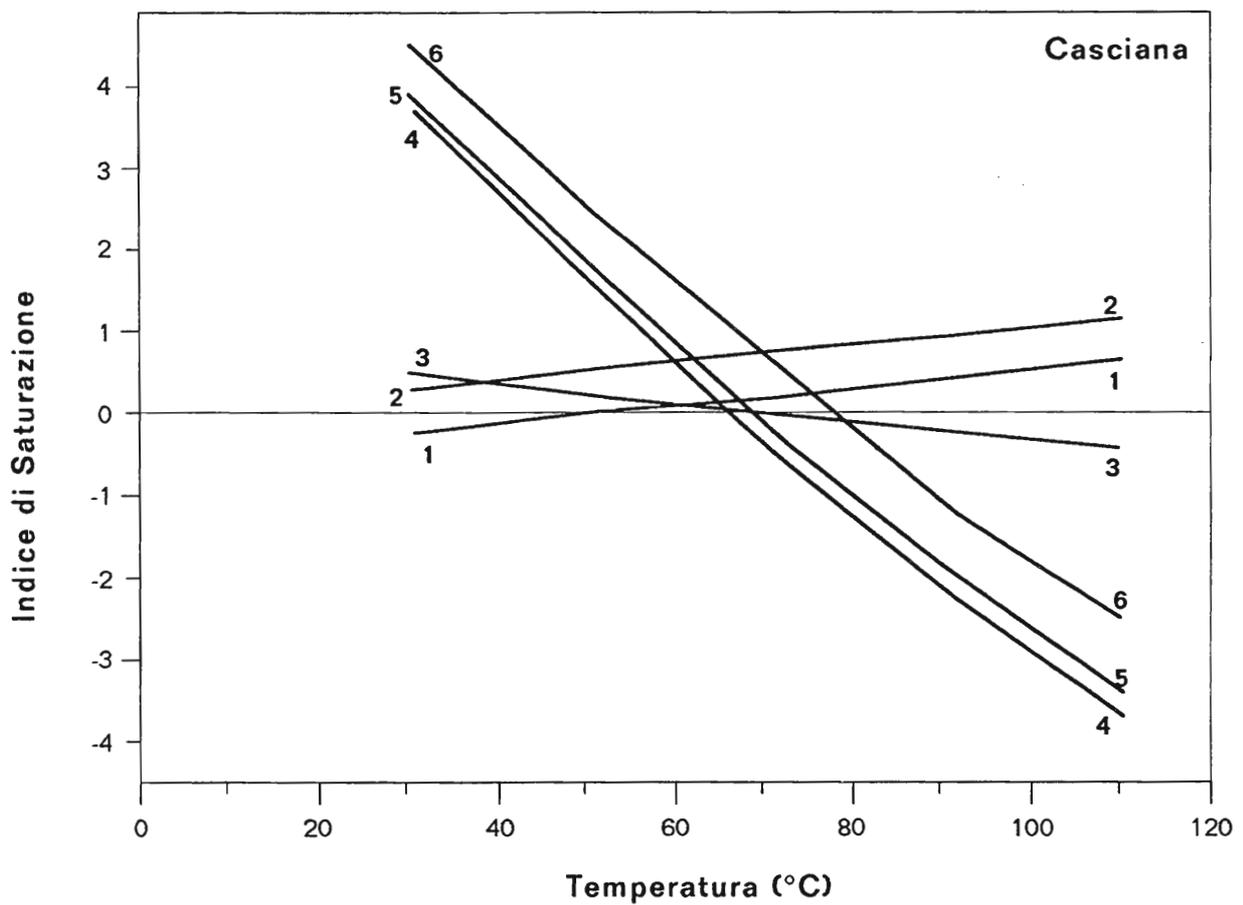
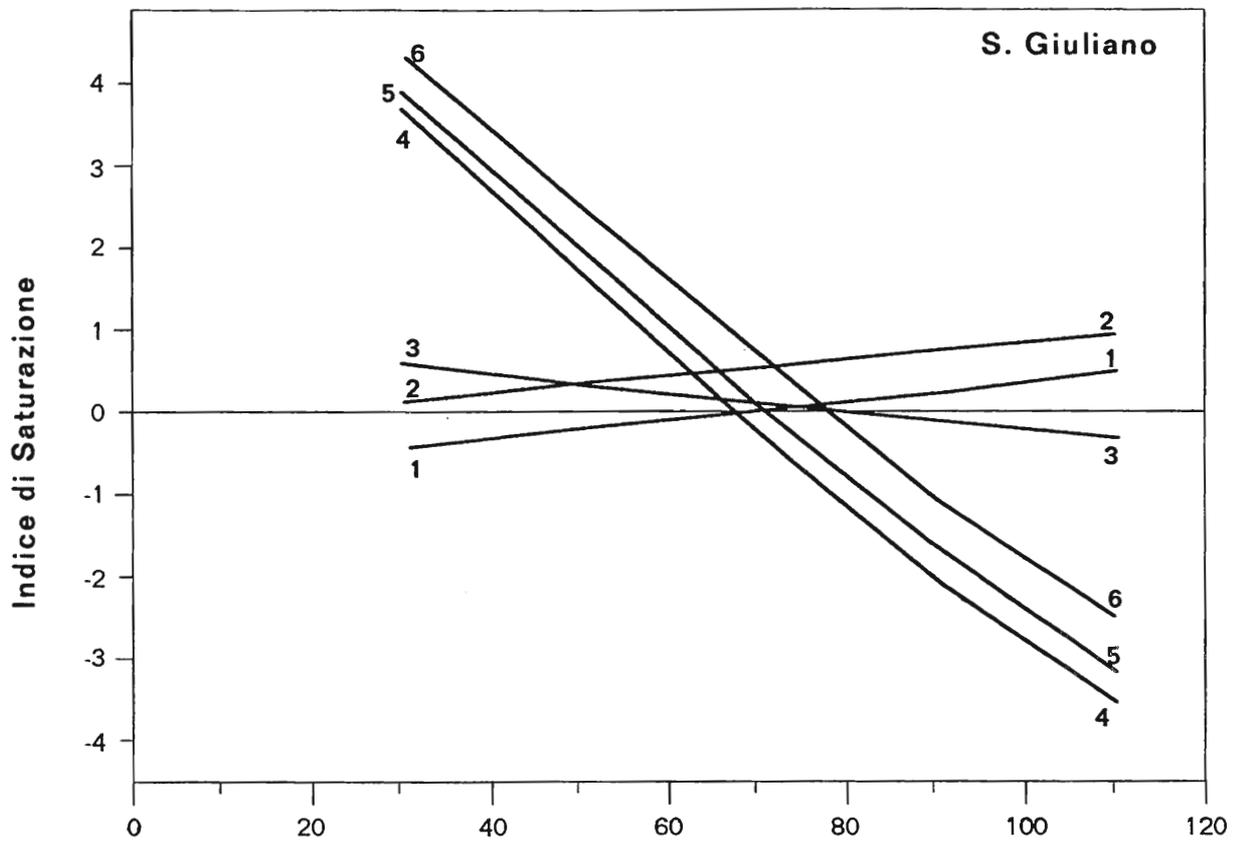


Fig. 8 Indice di saturazione in funzione della temperatura per i sistemi idrotermali di S. Giuliano e Casciana Terme.
 1) Anidrite, 2) calcite, 3) quarzo, 4) K-, 5) Mg-, 6) Na-smectiti.

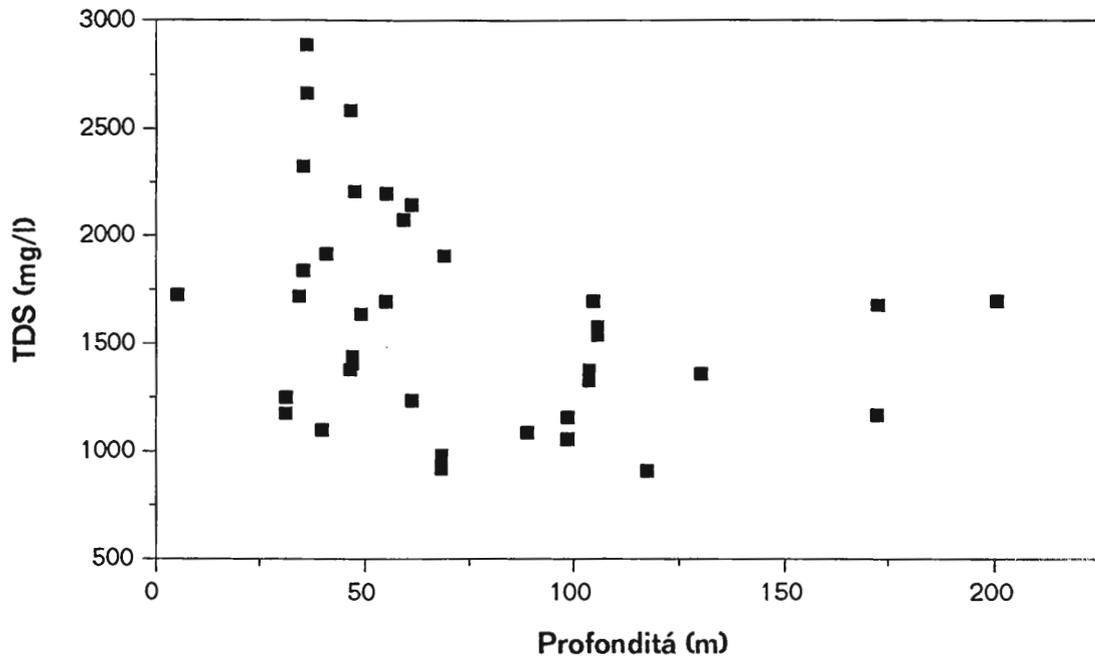


Fig. 9 Salinit  totale (TDS) in funzione della profondit  per i pozzi della zona di Pisa.

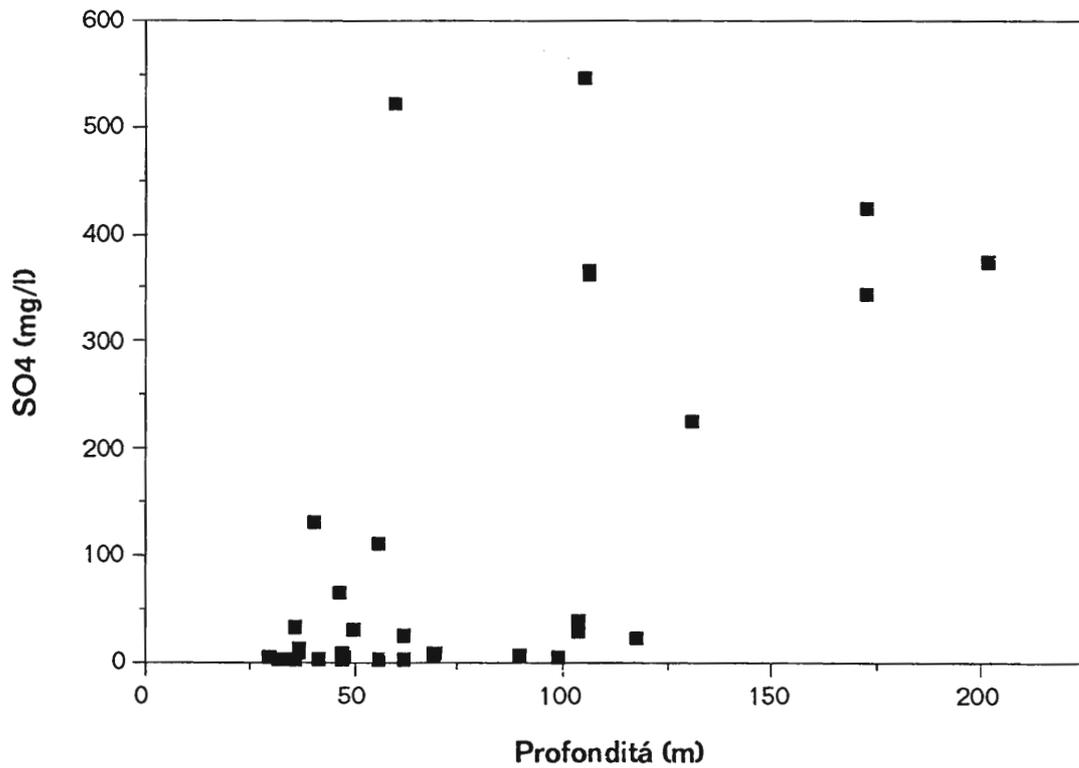


Fig. 10 Solfato in funzione della profondit  per i pozzi della zona di Pisa.

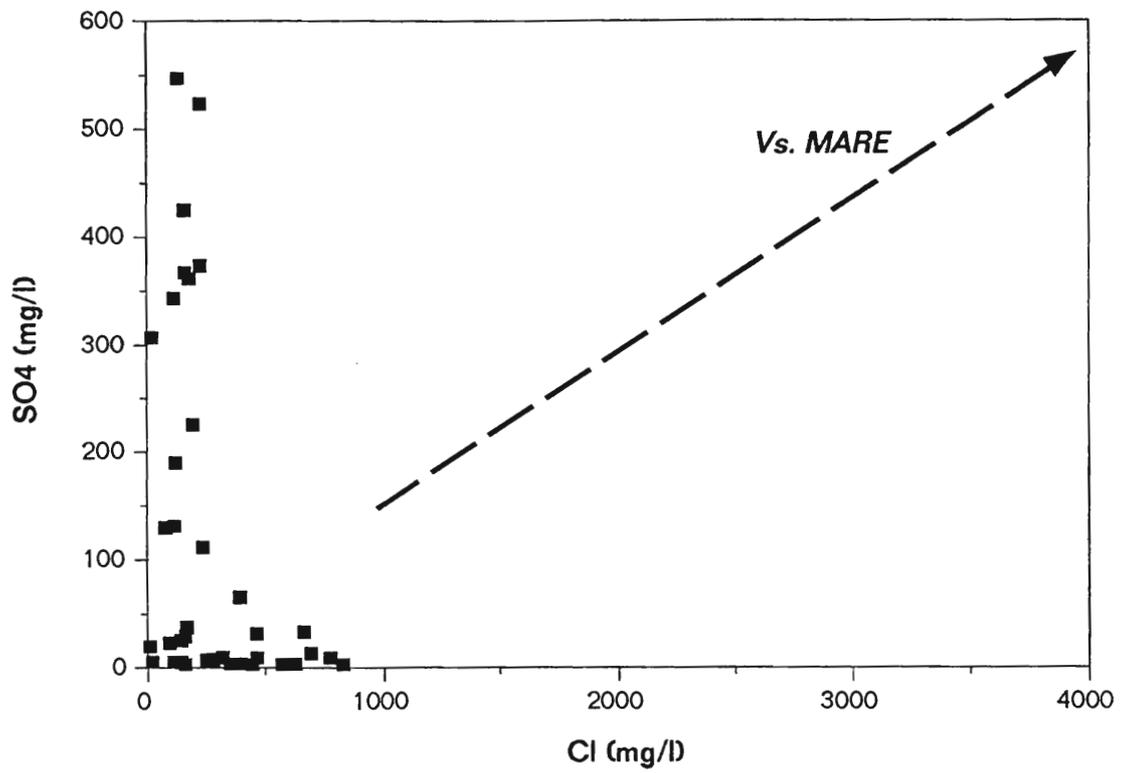


Fig. 11 Solfato vs. cloro per le acque della zona di Pisa.

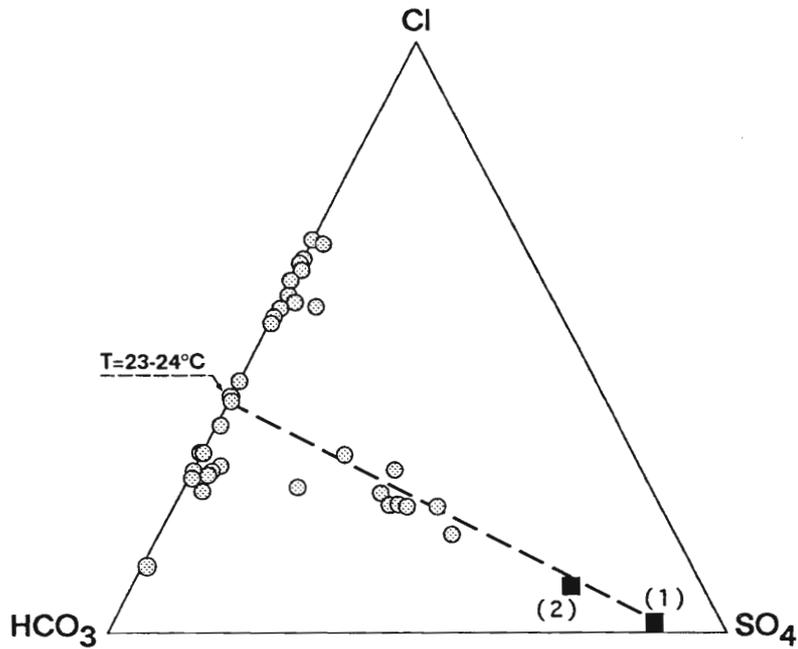


Fig. 12 Diagramma triangolare HCO_3 - SO_4 - Cl per le acque della zona di Pisa (\odot) e per i sistemi idrotermali (\blacksquare) di Casciana (1) e S.Giuliano Terme (2). Vengono segnalati i punti rappresentativi dei pozzi della zona settentrionale della città con temperature di 23-24°C.

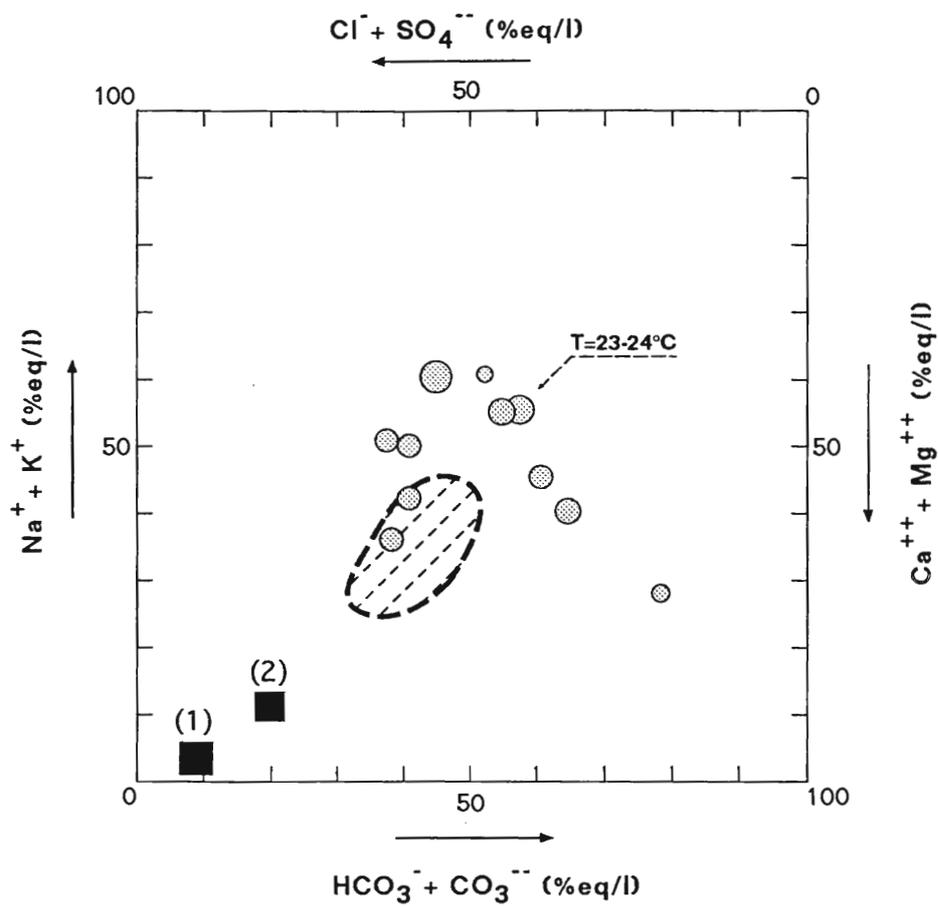


Fig. 13 Diagramma di Ludwig-Langelier per le acque della zona di Pisa a nord dell'Arno (⊙) e per i sistemi idrotermali (■) di Casciana (1) e S.Giuliano Terme (2). I simboli sono proporzionali alla salinità totale. L'area tratteggiata individua il campo delle acque a componente solfatica della pianura di Pisa

Pozzo Monte Pisano (Calci)

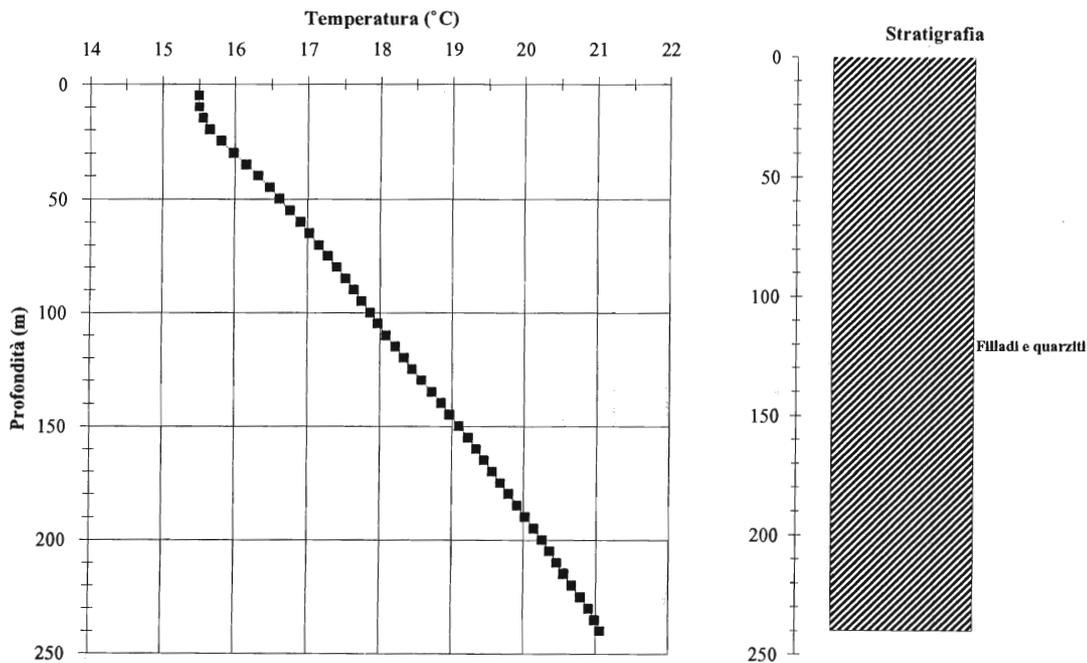


Fig. 14 : Log termico e stratigrafia pozzo Monte Pisano

29/09/93	27/10/93	Prof.
17.18	16.65	10
17.24	16.78	15
17.53	17.07	20
17.91	17.55	25
18.15	17.87	30
18.51	18.26	35
18.8	18.64	40
18.99	18.98	45
19.45	19.3	50
19.56	19.54	55
19.83	19.76	60
20.01	19.98	65
20.27	20.23	70
20.54	20.55	75
20.87	20.89	80
21.18	21.19	85
21.41	21.44	90
21.65	21.68	95
21.88	21.87	100
22.12	22.25	105
22.46	22.64	110
	22.74	113
22.8		115
22.92		117

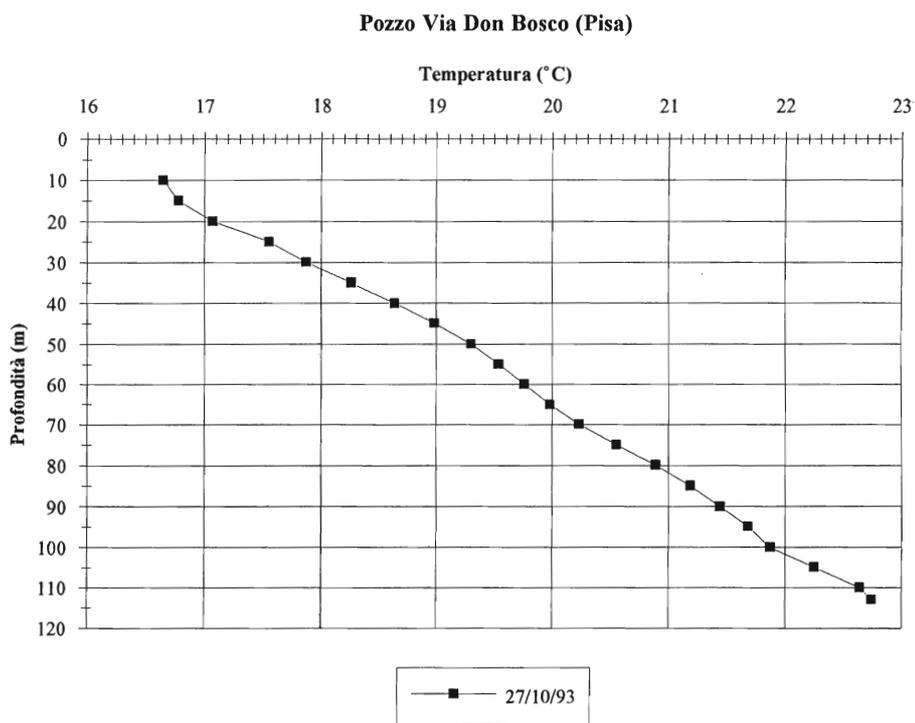


Fig. 15 Pozzo Via Don Bosco - Pisa : log termici

IIRG-CNR Pisa / POZZO AREA DI RICERCA CNR

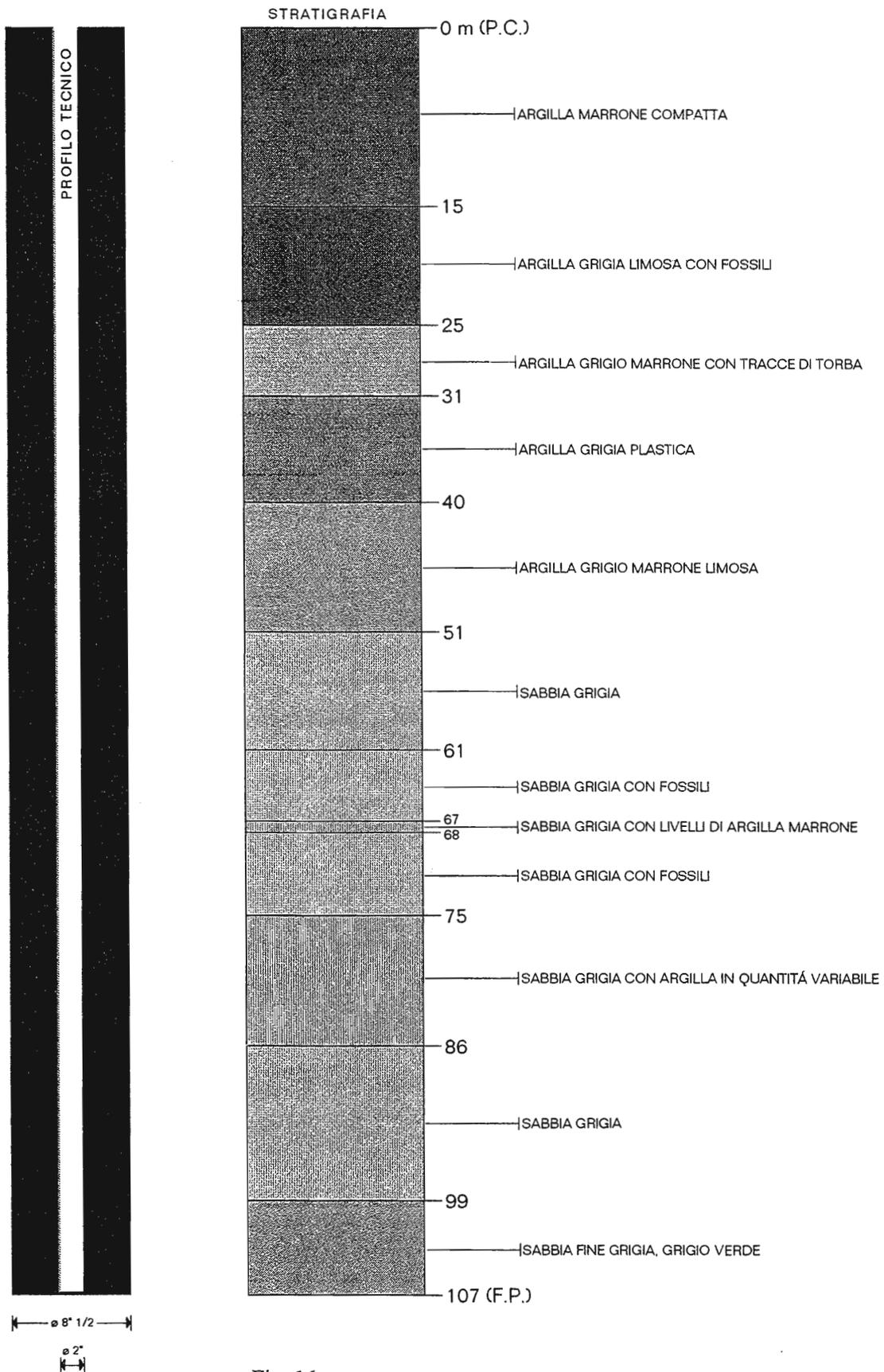


Fig. 16

12/11/93	19/11/93	03/12/93	16/12/93	19/01/94	18/02/94	Prof
17.42	17.36	17.1	16.85	15.9	15.61	5
17.05	16.38	16.18	16.13	16.07	16.05	10
17.59	16.77	16.51	16.42	16.3	16.27	15
17.8	17.08	16.86	16.78	16.68	16.65	20
18	17.38	17.22	17.16	17.06	17.03	25
19.96	18.35	17.83	17.67	17.48	17.4	30
21.52	19.08	18.33	18.12	17.88	17.81	35
21.11	19.23	18.59	18.39	18.17	18.1	40
21.82	19.66	18.97	18.75	18.54	18.46	45
22.59	19.86	19.15	18.94	18.76	18.69	50
23.94	20.54	19.55	19.23	19.01	18.91	55
20.86	20.03	19.62	19.34	19.18	19.11	60
22.34	20.54	19.79	19.54	19.39	19.32	65
21.77	20.42	19.94	19.72	19.63	19.57	70
22.09	20.68	20.19	19.99	19.9	19.84	75
23.07	21.17	20.49	20.26	20.13	20.07	80
22.98	21.33	20.75	20.5	20.35	20.28	85
25.25	22.13	21.17	20.84	20.63	20.54	90
24.52	22.1	21.33	21.02	20.83	20.74	95
25	22.46	21.63	21.3	21.08	20.96	100
26.64	22.95	21.99	21.46	21.23	21.13	105

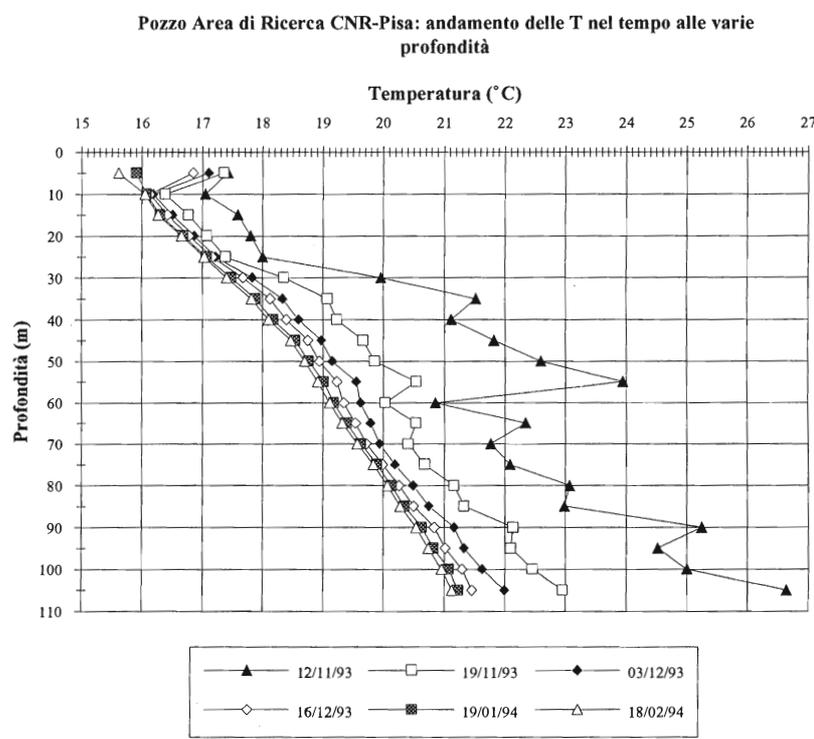


Fig. 17 Pozzo Area CNR - Pisa: log termici

Pozzo Area di Ricerca CNR-Pisa: log termico con temperature stabilizzate

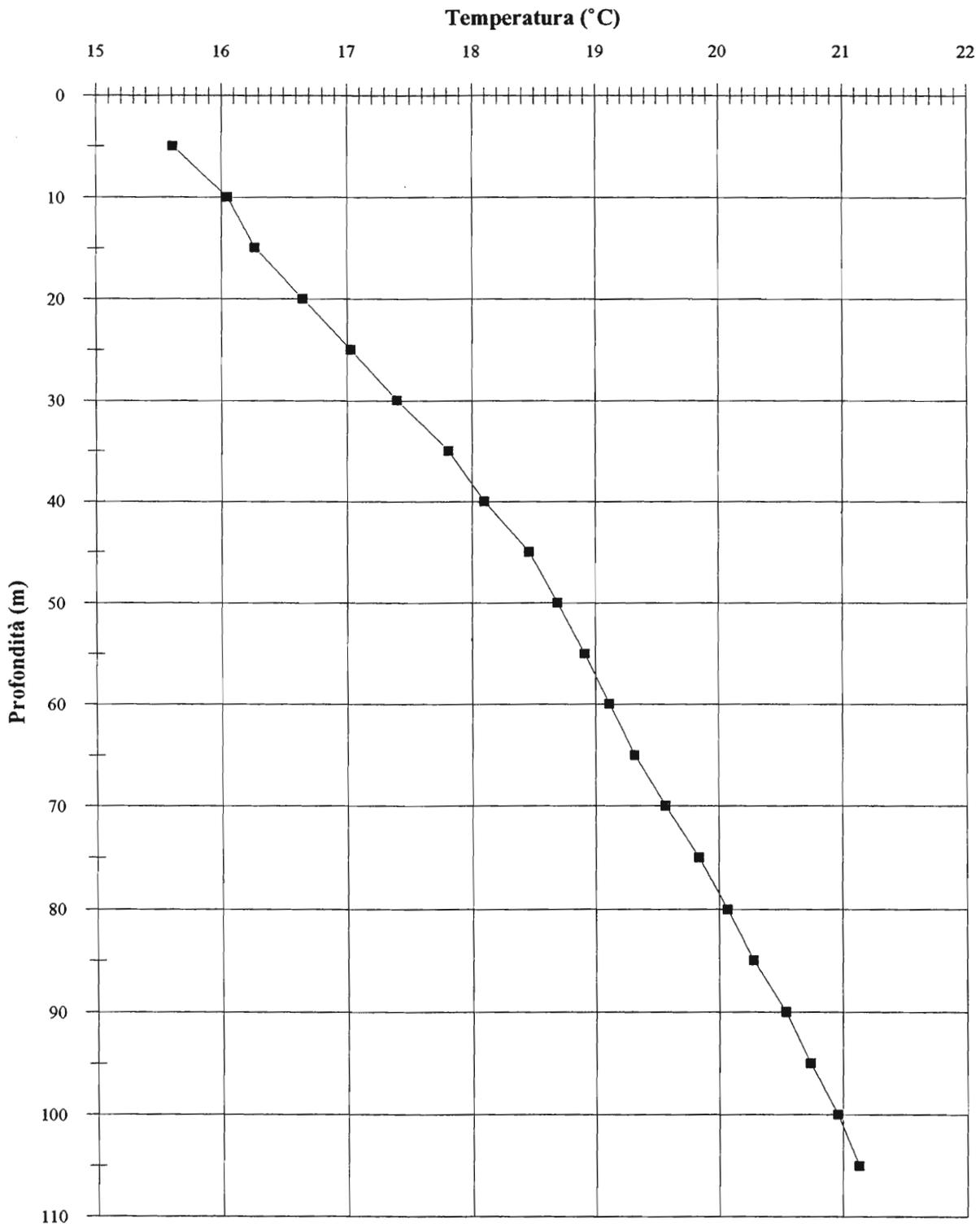


Fig. 17 bis: pozzo Area CNR: log termico finale

—■— 18/02/94

IIRG-CNR Pisa / POZZO LA ROTTA

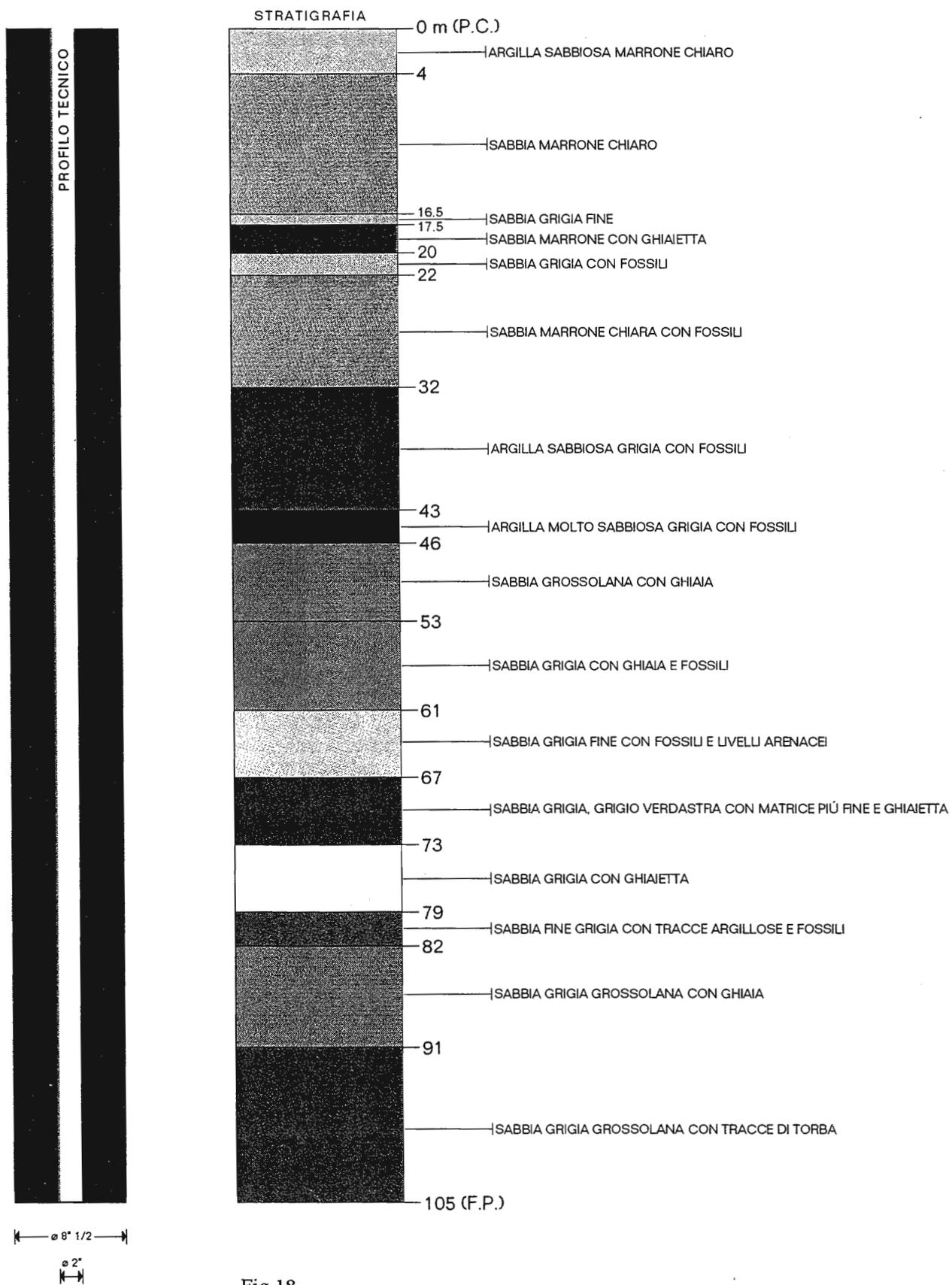


Fig.18

02/12/93	15/12/93	27/12/93	18/01/94	16/02/94	Prof.
16.6	16.2	15.75	15.02	14.03	5
16.36	15.45	15.19	15.05	14.98	10
15.7	15.06	14.85	14.74	14.7	15
15.76	15.14	14.93	14.78	14.73	20
16.01	15.26	15.01	14.85	14.79	25
15.82	15.24	15.04	14.93	14.87	30
15.96	15.41	15.21	15.09	15.04	35
16.18	15.6	15.39	15.27	15.22	40
17.02	16.08	15.76	15.55	15.45	45
17.42	16.3	15.98	15.75	15.65	50
16.88	16.21	16	15.85	15.8	55
17.01	16.39	16.18	16.05	16	60
17.65	16.78	16.49	16.29	16.19	65
17.72	16.91	16.66	16.51	16.37	70
17.81	17.12	16.9	16.76	16.62	75
19.33	17.93	17.45	17.21	17	80
19.69	18.23	17.78	17.48	17.24	85
19.08	18.03	17.71	17.52	17.36	90
18.5	17.9	17.7	17.59	17.5	95
18.53	18.04	17.86	17.78	17.69	100

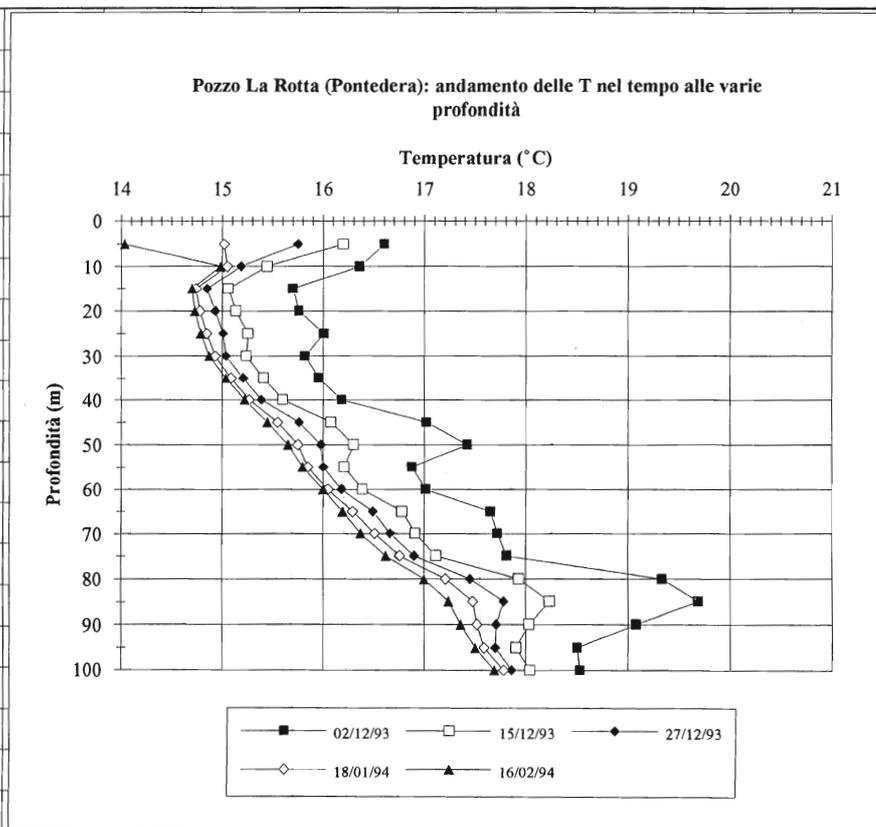


Fig. 19 Pozzo La Rotta (Pontedera) : log termici

Pozzo La Rotta (Pontedera): log termico con temperature stabilizzate

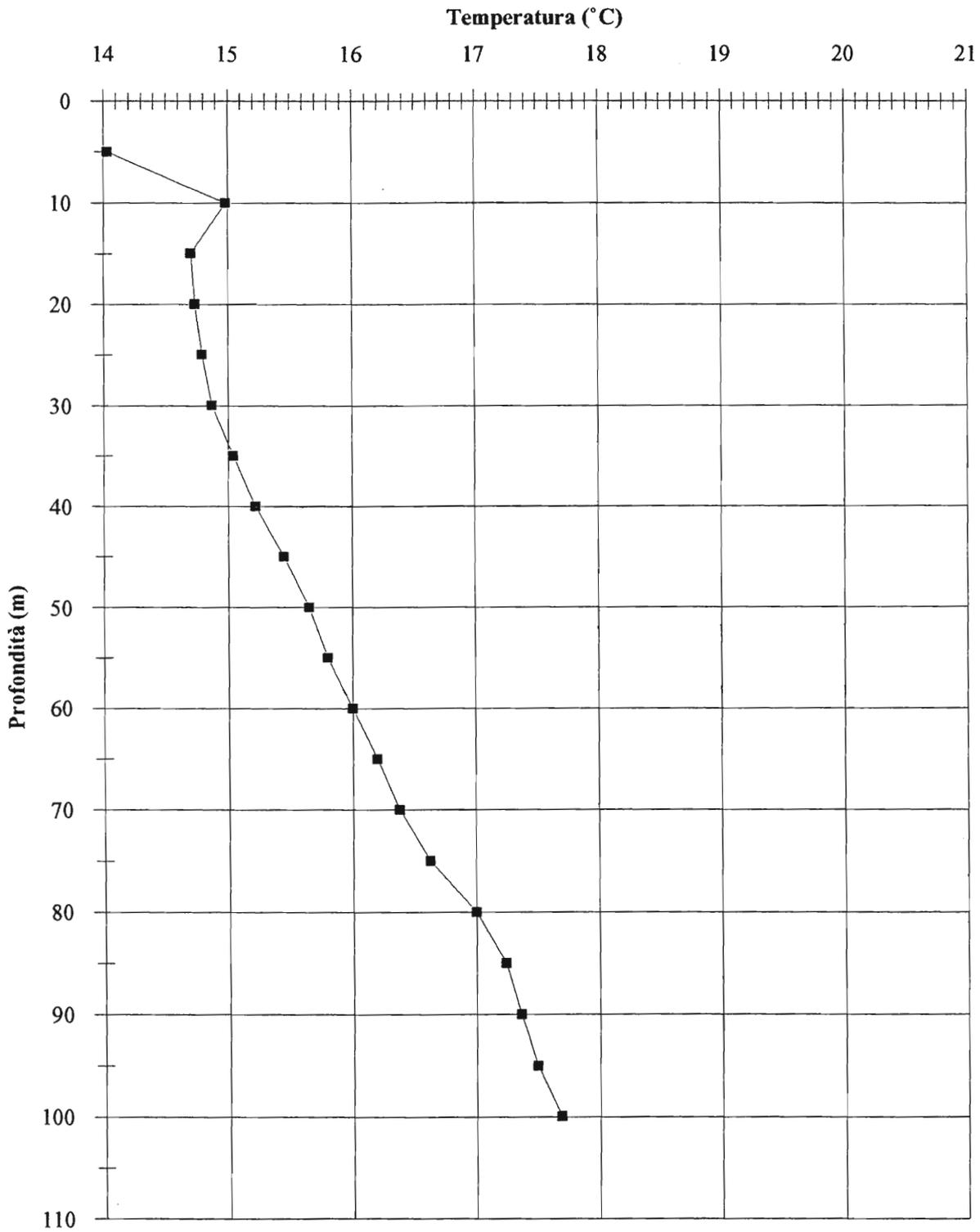


Fig. 19 bis: pozzo La Rotta: log termico finale

—■— 16/02/94

IIRG-CNR Pisa / POZZO CASA PINZALE

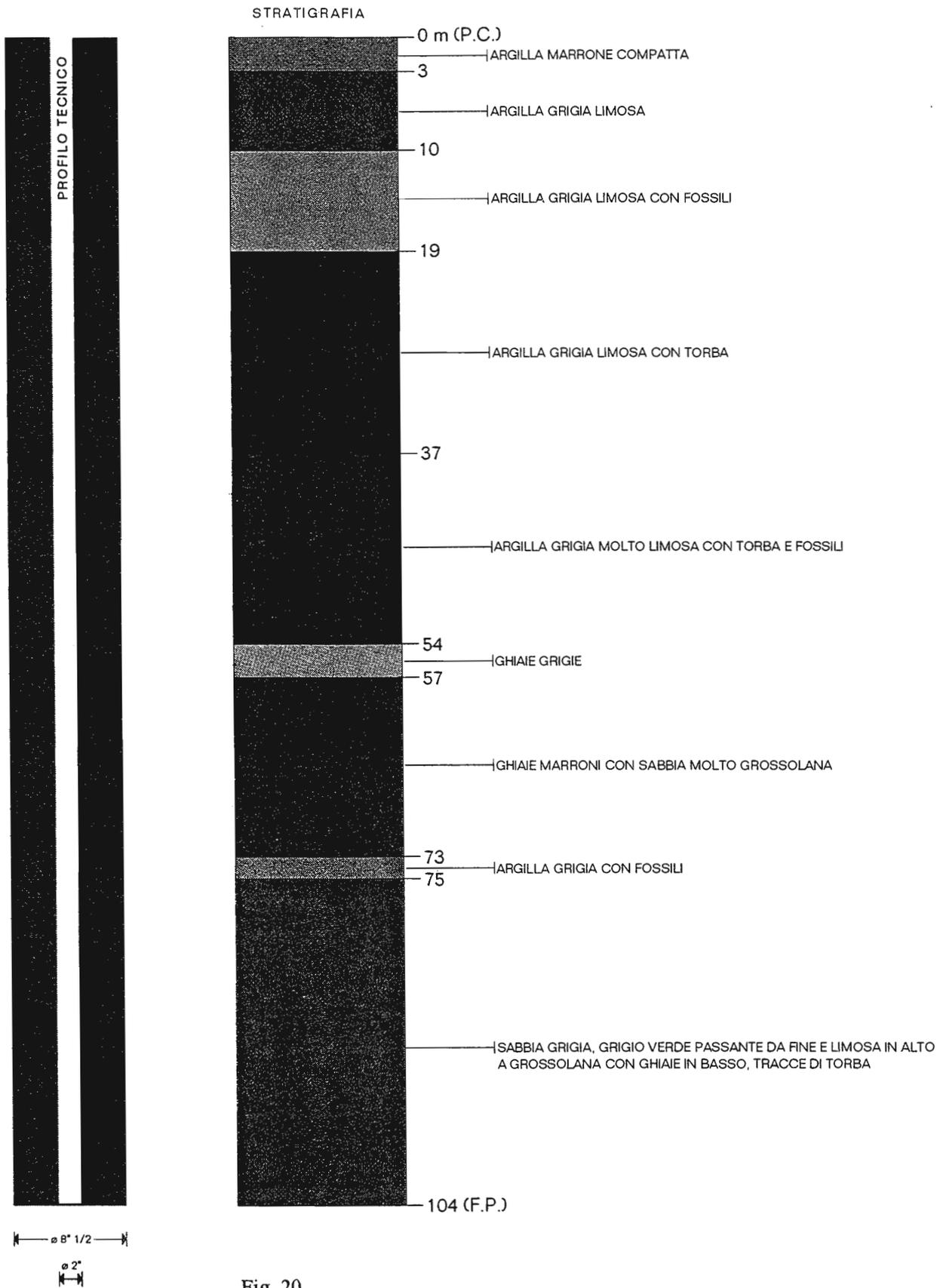


Fig. 20

Pozzo Casa Pinzale: andamento delle T nel tempo alle varie profondità

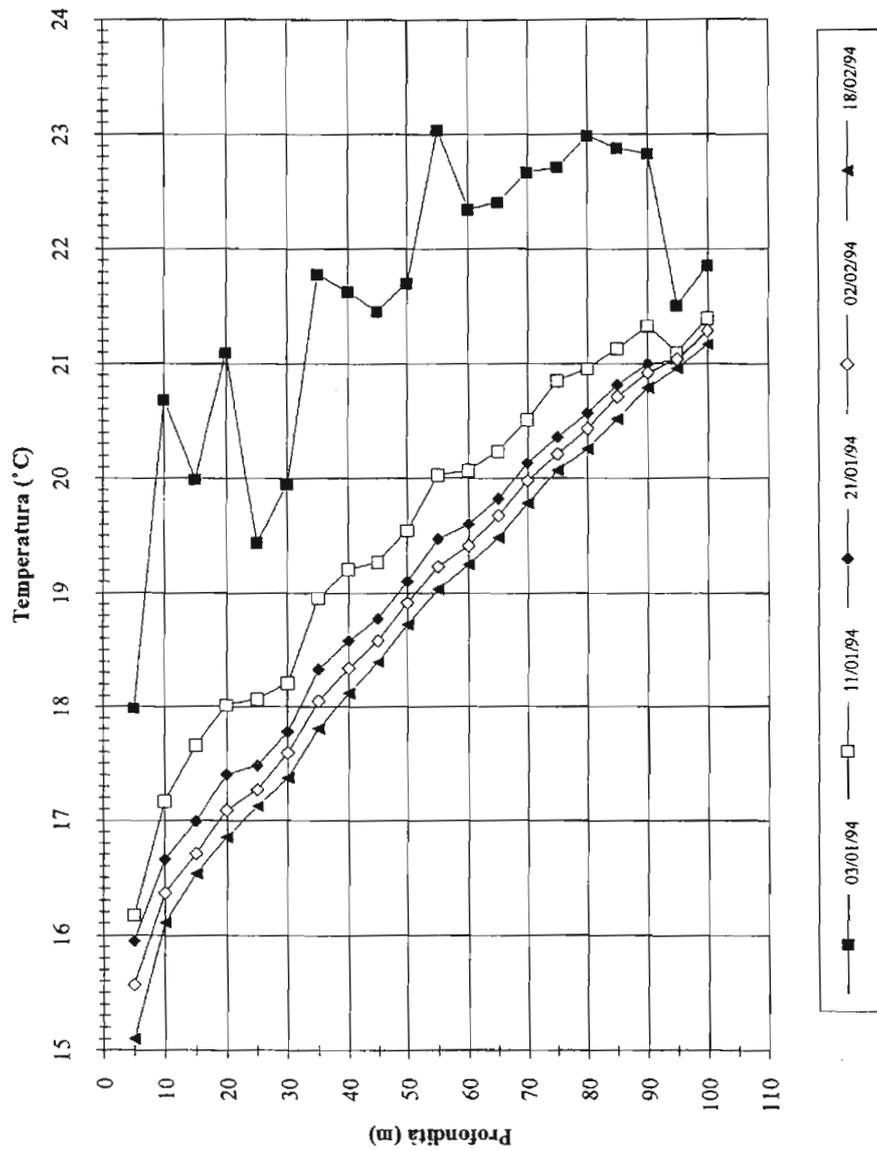


Fig. 21 pozzo Casa Pinzale: log termici

03/01/94	11/01/94	21/01/94	02/02/94	18/02/94	Prof
17.99	16.17	15.95	15.57	15.1	5
20.69	17.17	16.66	16.36	16.1	10
19.99	17.66	16.99	16.71	16.53	15
21.1	18.02	17.4	17.09	16.85	20
19.44	18.07	17.48	17.27	17.12	25
19.95	18.21	17.78	17.59	17.37	30
21.78	18.96	18.33	18.05	17.81	35
21.63	19.21	18.58	18.34	18.12	40
21.46	19.27	18.77	18.58	18.39	45
21.7	19.55	19.1	18.91	18.72	50
23.04	20.03	19.47	19.23	19.03	55
22.35	20.07	19.6	19.41	19.25	60
22.41	20.24	19.82	19.67	19.48	65
22.67	20.51	20.13	19.98	19.78	70
22.71	20.85	20.36	20.21	20.07	75
22.99	20.96	20.57	20.43	20.26	80
22.88	21.13	20.81	20.71	20.52	85
22.83	21.33	21	20.92	20.79	90
21.51	21.1	21.03	21.04	20.96	95
21.86	21.4	21.29	21.29	21.17	100

Pozzo Monte Nevoso 1 D

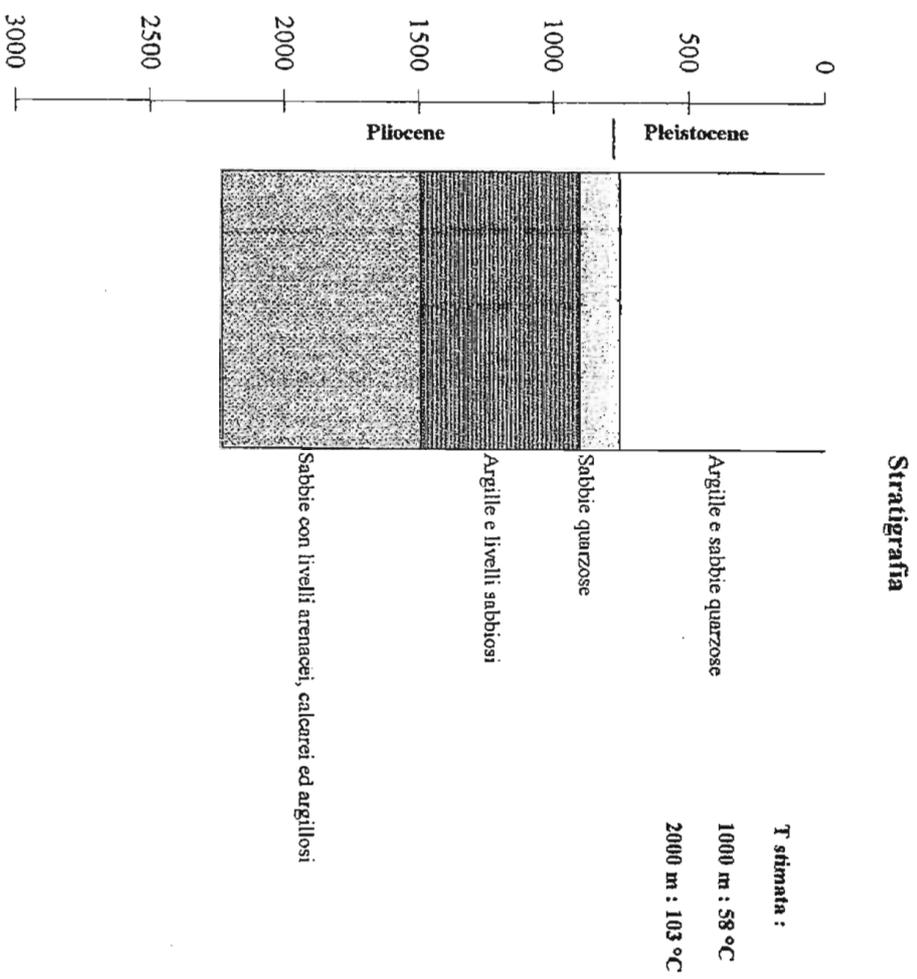
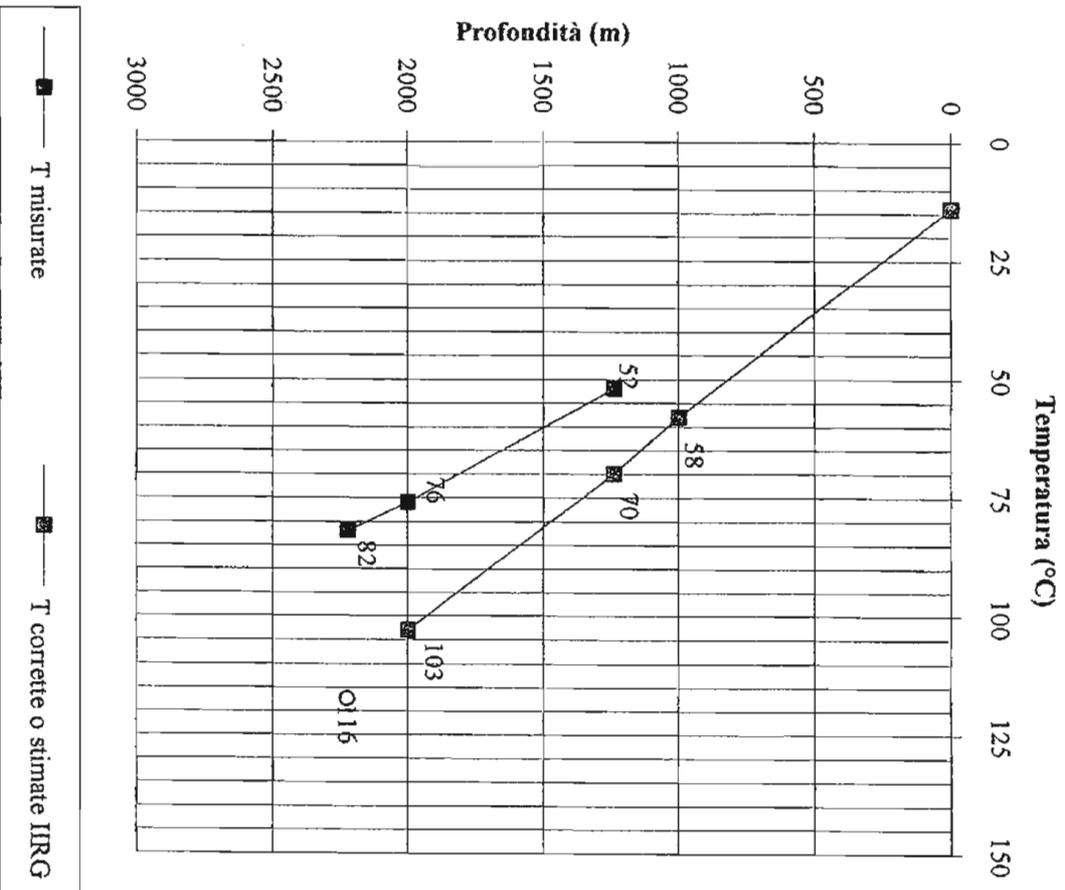


Fig. 22 : Log termico e stratigrafia pozzo Monte Nevoso 1D

Pozzo Tombolo 2 D

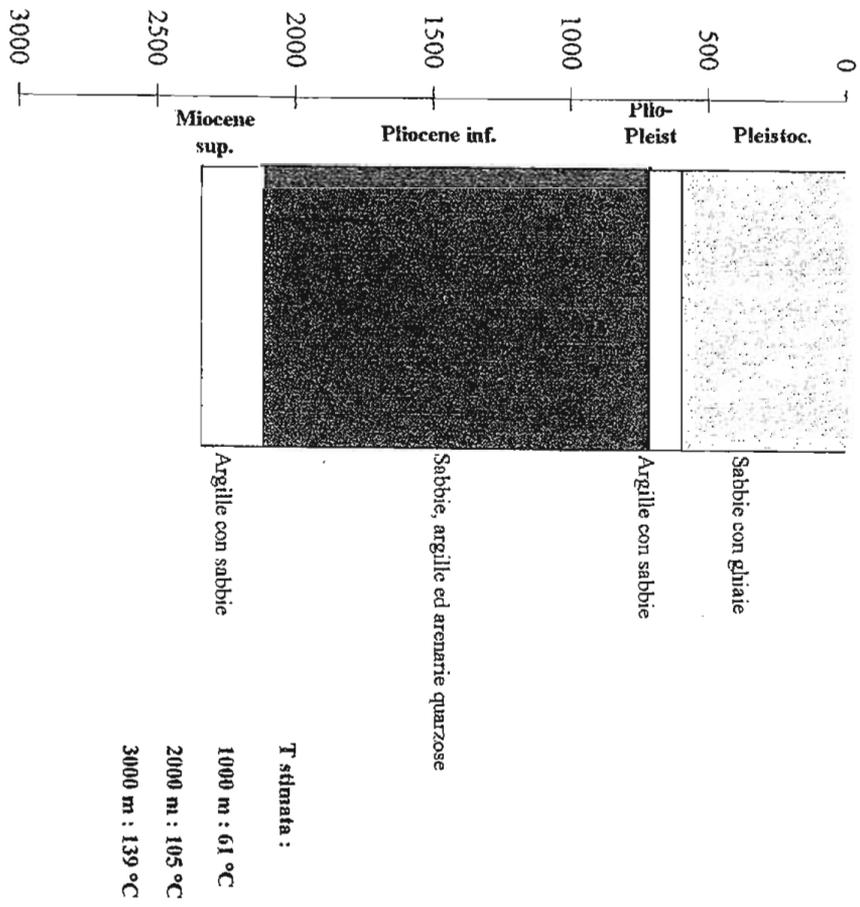
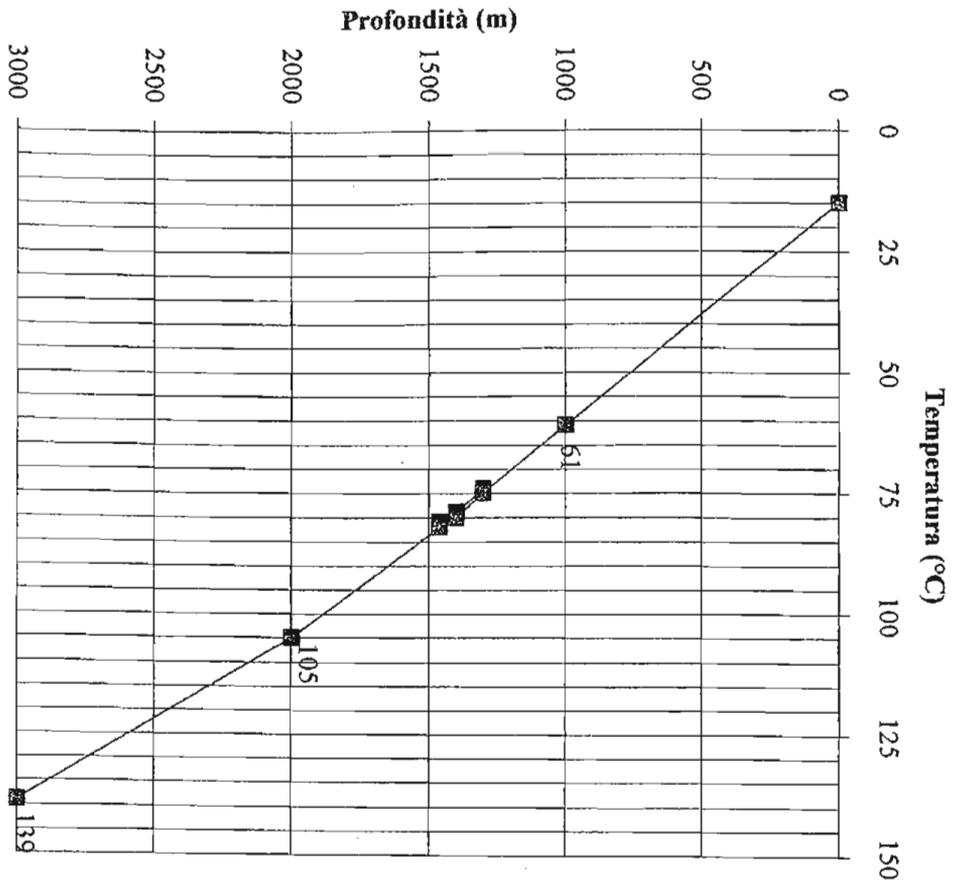


Fig. 23 : Log termico e stratigrafia pozzo Tombolo 2D

Pozzo Tombolo 3

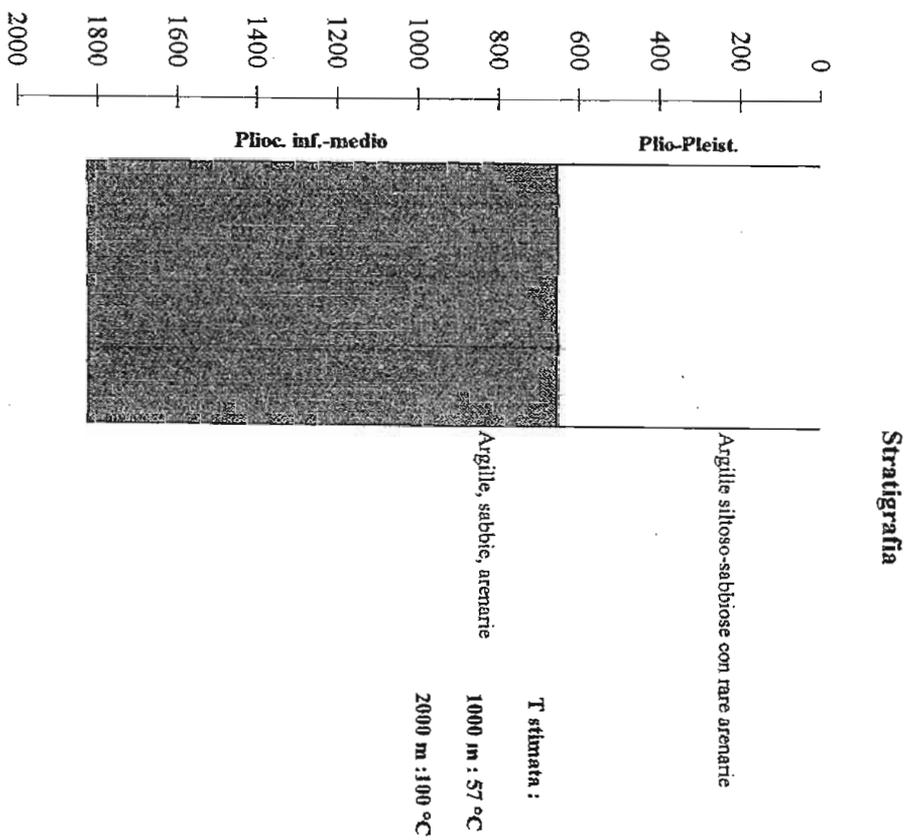
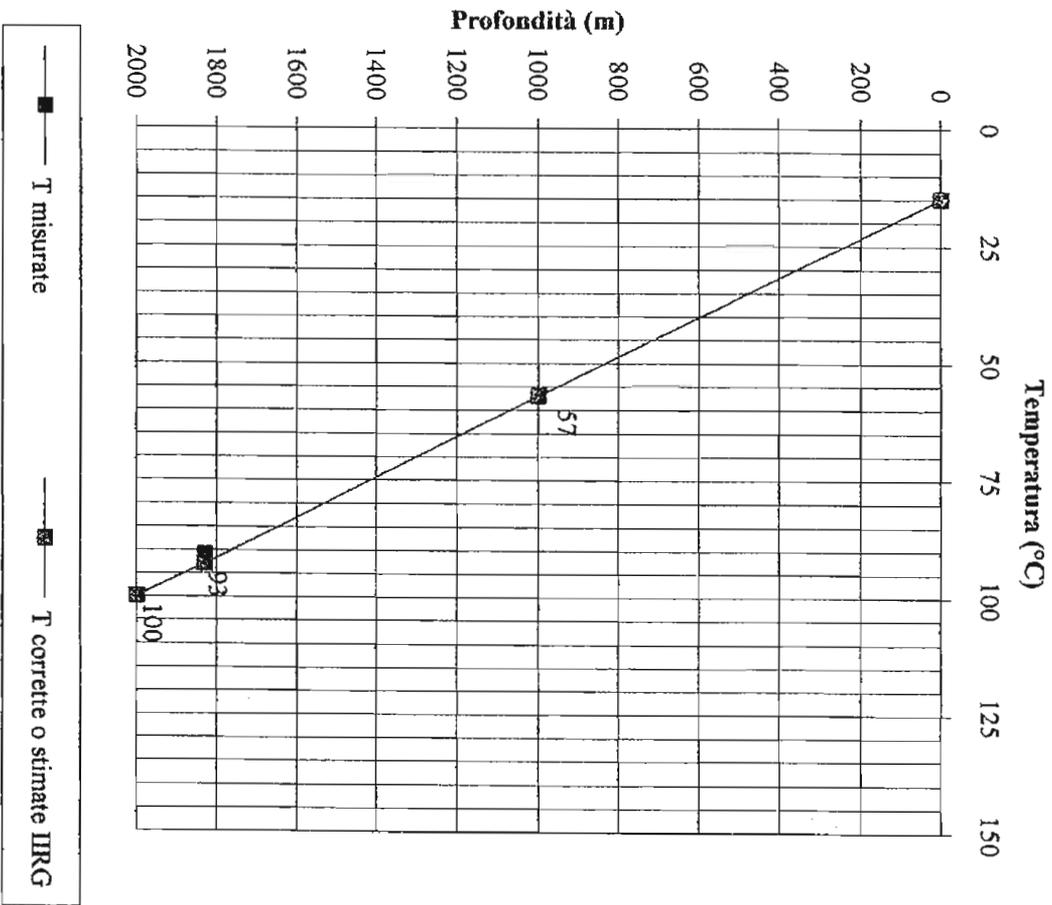


Fig. 24 : Log termico e stratigrafia pozzo Tombolo 3

Pozzo Pontetetto

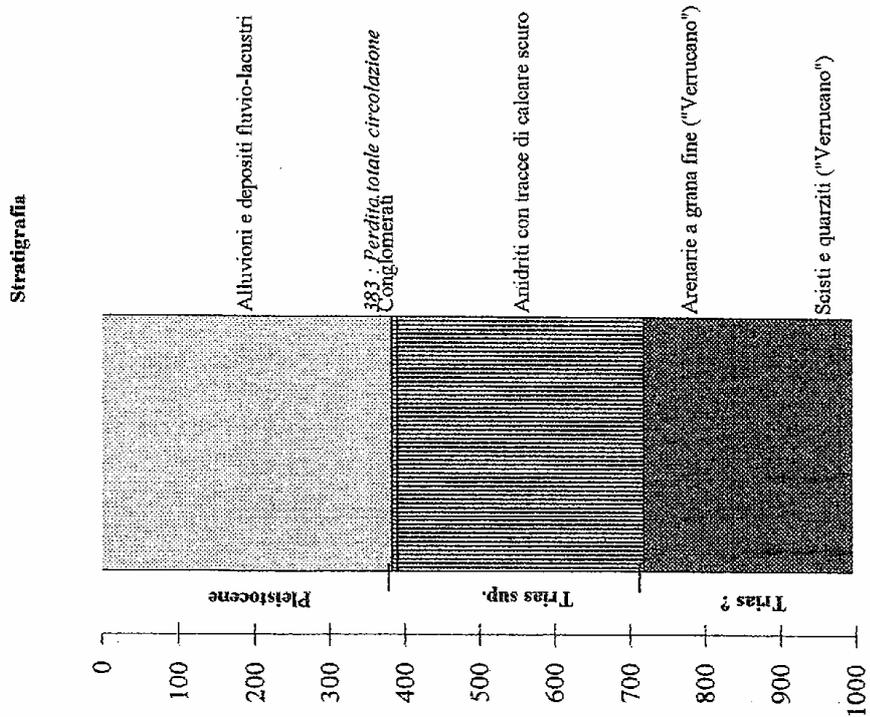
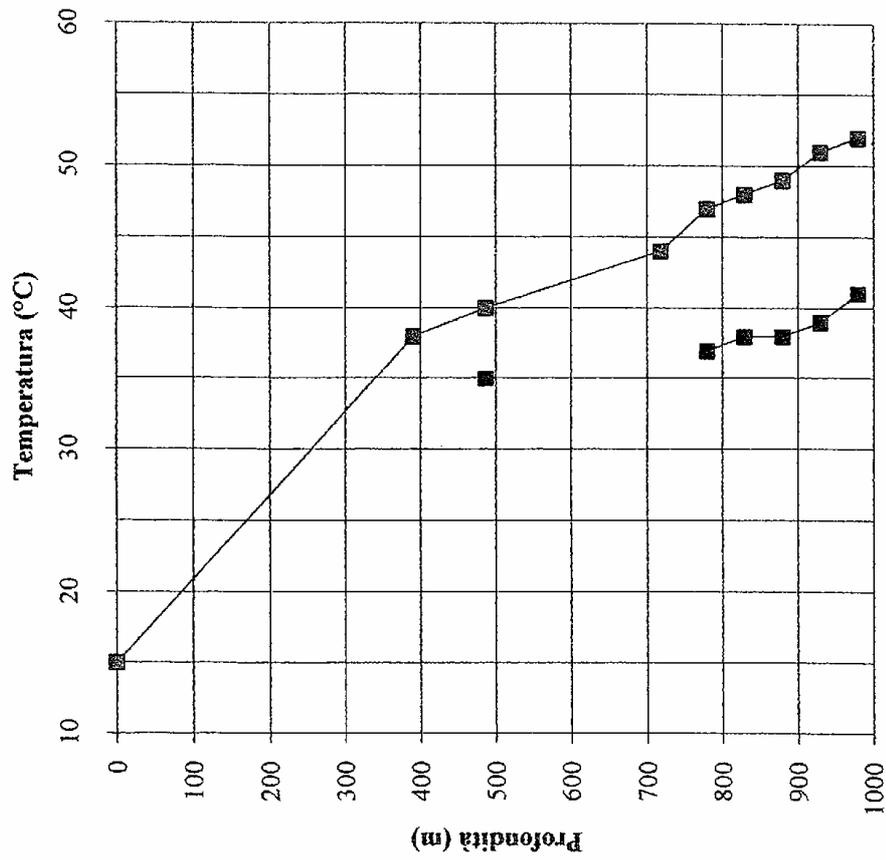
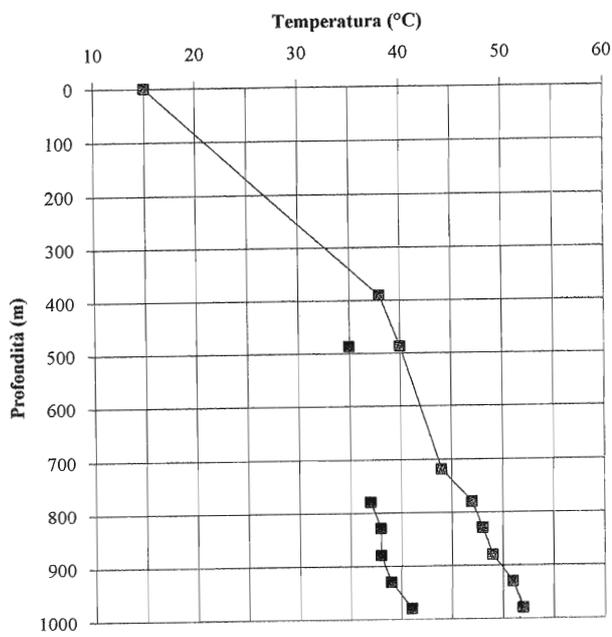


Fig. 25 : Log termico e stratigrafia pozzo Pontetetto

Pozzo Pontetetto



T misurate non stabilizzate
 T corrette o stimate IIRG

Stratigrafia

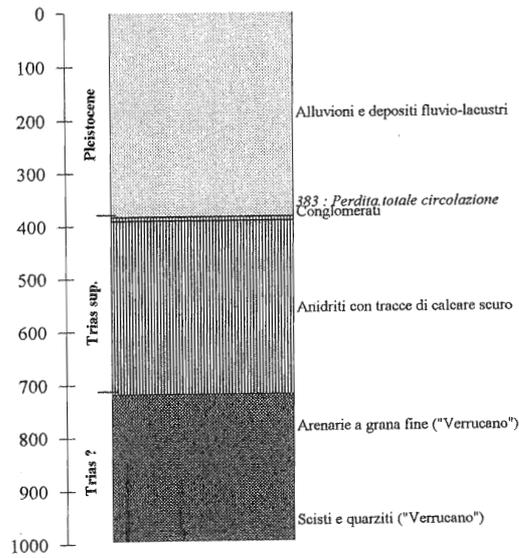


Fig. 25 : Log termico e stratigrafia pozzo Pontetetto

Fig.26 : dati termici pozzo La Rotta (Pontedera)

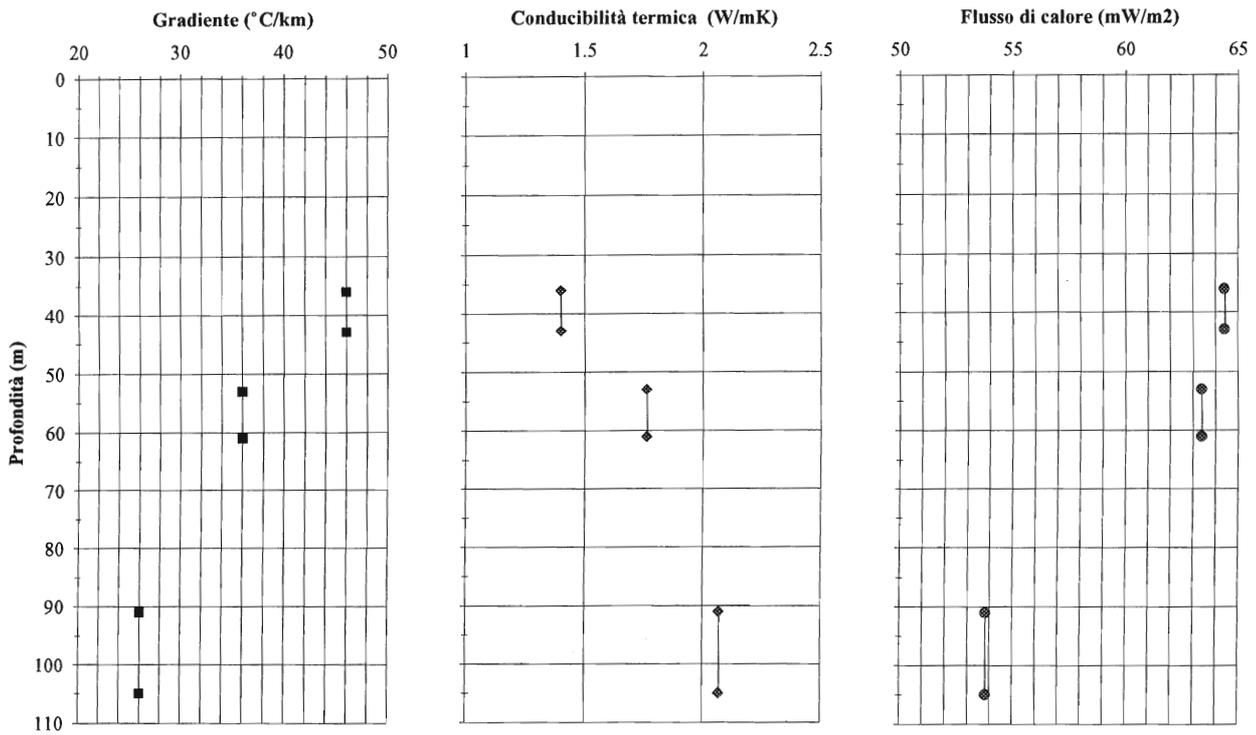


Fig. 27 : dati termici pozzo Casa Pinzale (Loc. Arnaccio)

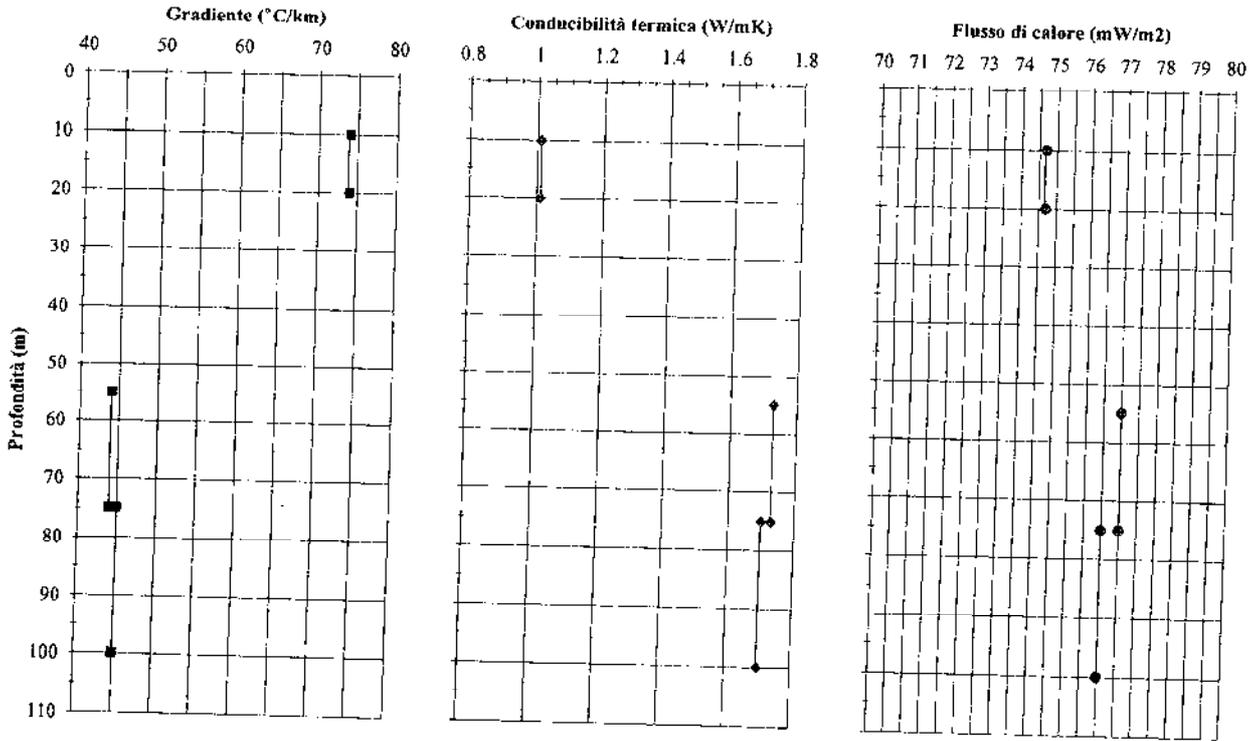


Fig. 28 : dati termici pozzo Area di Ricerca CNR - Pisa

