

E. PRANZINI (*), G. PRANZINI (*)

LE SORGENTI DI ACQUA DOLCE IN MARE
LUNGO LE COSTE DELL'ISOLA D'ELBA
RILEVATE PER MEZZO DI IMMAGINI TERMICHE

Riassunto — Immagini rilevate da aereo nella banda 9-11 μ nell'agosto 1981 hanno evidenziato 77 deboli anomalie termiche riferibili ad immissioni, concentrate o diffuse, di acqua dolce in mare lungo le coste dell'Isola d'Elba.

Misure dirette di temperatura e conducibilità elettrica, effettuate nel giugno 1985, hanno permesso di confermare la presenza delle sorgenti più importanti, ubicate in corrispondenza di faglie o fratture delle rocce a buona permeabilità.

Il mancato riscontro di immissioni di acqua dolce in corrispondenza di alcune delle anomalie termiche minori può dipendere dalle condizioni meteomarine non ottimali verificatesi al momento dei controlli; in alcuni punti, tuttavia, è stata rilevata la presenza di piccole variazioni di temperatura in tratti di mare con salinità costante.

Maggiori dubbi sussistono sull'interpretazione di alcune deboli deformazioni del campo di correnti, evidenziate per mezzo dell'analisi armonica, in corrispondenza di litologie poco permeabili. Si ritiene che queste possano con ogni probabilità essere messe in relazione alla circolazione d'acqua marina indotta dal moto ondoso sotto costa in aree caratterizzate da forti esposizioni.

Il confronto fra i risultati delle indagini idrogeologiche a terra (BENCINI *et al.*, 1986) e quelli derivati dall'analisi delle immagini termiche permette di trarre informazioni utili per una migliore conoscenza dell'idrogeologia dell'Isola d'Elba, finalizzata anche al reperimento di nuove risorse idriche per quest'area notevolmente deficitaria.

Abstract — *The fresh water springs along the Elba Island coastline acquired by thermal infrared images.* Thermal infrared images acquired in August 1981 by an airborne radiometer show 77 weak fresh water springs along the Elba Island coastline.

Temperature and conductivity measures of the sea water collected in June 1985 in some sites allowed us to confirm the existence of only the largest springs, most of which are located near fractures of somewhat permeable rock outcrops.

On the other hand not all the weak thermal anomalies have been confirmed by the temperature measures, which are probably not completely reliable because of wave induced turbulence affecting the coastal areas during the measurements.

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

In some other cases low differences in water temperature were not associated with salinity differences and can be explained by marine currents.

More doubts remain on the interpretation of the weak current field deformations, which appear on harmonic analysis images, in front of impermeable rocks. We think that they must be correlated to wave induced water circulation near exposed coasts.

Comparisons between the results of an hydrogeological study (BENCINI *et al.*, 1986) and the present study allow us to obtain information which contributes to a better understanding of the Elba Island hydrogeology and which could lead to a better exploitation of water resources.

Key words — Remote sensing, Hydrogeology, Submarine springs, Elba Island.

PREMESSA

Dati rilevati da sensori posti su aereo ed operanti nel campo delle microonde e dell'infrarosso termico sono stati ampiamente utilizzati per l'identificazione di immissioni di acqua dolce in mare.

I sensori che operano nel campo delle microonde, e che si presentano come i più promettenti per le future applicazioni, dato che permettono di rilevare da distanza anche i valori della salinità, sono ancora in fase di sperimentazione (PRABHAKARA e DALU, 1976; SWIFT e Mc INTOSH, 1983) e poche sono le applicazioni volte all'identificazione di risorse utilizzabili.

Al contrario i dati rilevati nell'infrarosso termico hanno trovato numerose applicazioni anche in Italia (BOLTRI, GUGLIELMINETTI e MARINO, 1975; LECHI e TINCATI, 1975; MARINO, 1975; GANDINO e TONELLI, 1983) e costituiscono al momento l'unico sistema concretamente utilizzabile per un censimento delle sorgenti in mare.

Finora, tuttavia, i ricercatori hanno rivolto la loro attenzione prevalentemente verso le sorgenti più importanti, tralasciando la verifica delle più piccole anomalie termiche. Dato che il presente studio trova la sua motivazione nella carenza di risorse idriche che affligge l'Isola d'Elba, tutte le sorgenti sottomarine individuate in prossimità della costa, una volta correlate con le caratteristiche idrogeologiche della fascia costiera, possono fornire dati utili per l'identificazione dei deflussi sotterranei e quindi per localizzare eventuali pozzi. Per questo motivo lo studio dedica uguale attenzione anche alle piccole immissioni di acqua dolce in mare.

Proprio considerando la debolezza di quasi tutte le anomalie termiche registrate, si è ritenuto necessario eseguire controlli con

misure dirette di temperatura e salinità dell'acqua. Il confronto fra i dati telerilevati e la *verità a mare* non sempre consente di confermare la presenza di una sorgente individuata dalle riprese termiche, ma suggerisce alcune considerazioni, utili per un futuro approfondimento delle indagini.

METODOLOGIA

Nel corso di un volo effettuato il 16 agosto 1981 fra le 7,30 e le 8,30 di mattina (ora solare), programmato per il conteggio dei natanti presenti lungo costa, oltre che per l'aggiornamento della cartografia della Provincia di Livorno, furono realizzate delle riprese da 1.000 metri di quota lungo le coste dell'Isola d'Elba per mezzo di uno scanner termico Dedalus 1230 a due canali, 3-5 μ e 9-11 μ (1).

Il periodo delle riprese corrisponde a quello di massimo contrasto di temperatura fra l'acqua del mare (intorno ai 25° C) e quella delle sorgenti dell'Elba (mediamente sui 17° C per le sorgenti alle quote più basse).

I dati telerilevati sono stati trattati per mezzo di un elaboratore elettronico analogico per ottenere le immagini delle singole bande e per effettuare l'analisi armonica della banda 9-11 μ , di cui è stato anche fatto uno slicing in 7 livelli di un grado ciascuno nell'intervallo 17-24° C (Fig. 1).

Pur ricordando che l'energia registrata dal sensore non è direttamente correlabile con la temperatura della sorgente, vuoi per la differente emittanza delle varie superfici, vuoi per il contributo, generalmente negativo, dato dall'atmosfera, nel caso di superfici quasi omogenee come quella del mare e per aree vicine, dove si può assumere come costante l'influenza dell'atmosfera, è lecito ritenere che le variazioni di energia registrate corrispondano realmente a variazioni di temperatura. I dati termici in seguito riportati, quando rilevati da aereo, si riferiscono quindi alla temperatura di un corpo nero che si immagina aver emesso l'energia ricevuta dal sensore; queste temperature sono sensibilmente inferiori a quelle della sorgente (DALU, ULIVIERI e VIOLA, 1982); in particolare la temperatura del mare è stata rilevata pari a circa 18° C.

(1) Le riprese sono state effettuate dalla Soc. A.R.C.O. Rossi di Milano, su incarico dell'Amministrazione Provinciale di Livorno.



Fig. 1 - Slicing (in alto) e analisi armonica (in basso) della costa sud-orientale dell'Elba fra Punta di Vallemorta e Punta della Calamita. Si notano due evidenti immissioni concentrate. (Concessione S.M.A. n. 058 del 13/1/86).

Per controllare i risultati così ottenuti, nella seconda metà del mese di giugno 1985 è stata eseguita una campagna di misure della temperatura e della conducibilità elettrica dell'acqua in alcuni tratti di mare dove lo studio delle immagini termiche aveva permesso di ipotizzare la presenza di immissioni di acqua dolce. Il periodo in cui sono state effettuate le misure non corrisponde a quello delle riprese aeree, ma è stato scelto in base al regime delle sorgenti, che in giugno hanno portate notevolmente superiori a quelle di agosto. La primavera del 1985 è stata però caratterizzata da una notevole siccità e nel momento delle misure uno solo dei torrenti dell'isola aveva una, seppur debole, portata; è quindi probabile che anche le sorgenti si trovassero ormai in condizioni non molto diverse da quelle dell'estate inoltrata.

Si deve anche considerare che le condizioni del mare nei giorni delle misure sono state caratterizzate da un leggero moto ondoso, più pronunciato sulla costa occidentale, che ha presumibilmente accelerato la dispersione dell'acqua dolce immessa in mare.

Le misure sono state effettuate con un termometro digitale, capace di apprezzare il decimo di grado, e con un conducimetro DO tipo Subline, sempre a lettura digitale, che permette di leggere, nel campo di elevata conducibilità quale è quello dell'acqua marina, variazioni dell'ordine di 500 microSiemens/cm, corrispondenti ad una diluizione progressiva dell'acqua di mare con un 1,5% circa di acqua normale.

Le variazioni di temperatura dell'acqua condizionano direttamente quelle di conducibilità: un aumento di $0,1^{\circ}$ C corrisponde ad un aumento di circa $100 \mu\text{S/cm}$.

CARATTERISTICHE IDROLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE DELL'ISOLA D'ELBA

Il bilancio idrologico dell'Isola d'Elba per il sessantennio 1922-1981 risulta (BENCINI *et al.*, 1986):

Precipitazioni: = Evapotraspirazione + Deflussi

$$708 \text{ mm} = 507 \text{ mm} + 201 \text{ mm}.$$

Si può quindi osservare che ad un modesto valore delle precipitazioni si accompagna una elevata evapotraspirazione (pari al 71,6% delle precipitazioni). Ciò rende assai modesta la quantità d'acqua disponibile nell'Isola. Per di più, la distribuzione delle piogge nell'arco dell'anno determina un notevole deficit nei mesi estivi, quan-

do sono maggiori le necessità agricole e, soprattutto, quelle idropotabili, in relazione al consistente afflusso turistico.

Inoltre, la scarsità di rocce permeabili, fra quelle affioranti nell'Elba (Tav. I), fa sì che solo una piccola percentuale delle acque meteoriche si infiltri in profondità per andare a costituire riserve utilizzabili nei mesi estivi. Ne è una dimostrazione l'esiguità delle portate delle 165 sorgenti censite nell'Isola: in totale queste danno solo 66 litri al secondo, per un volume pari all'1,6% delle precipitazioni (BENCINI *et al.*, 1986).

La parte occidentale dell'Isola è occupata quasi interamente dalla Granodiorite del M. Capanne (2). Questa roccia ha una modesta permeabilità per fratturazione, che inoltre si riduce rapidamente con la profondità. Nella zona di Marciana Marina si ritrovano anche i Porfidi, le cui caratteristiche idrogeologiche sono simili a quelle della Granodiorite, e le Anfiboliti, solo un po' più permeabili.

Nella parte centrale dell'Elba affiorano prevalentemente i Porfidi ed i Flysch cretaceo ed eocenico, questi ultimi costituiti da alternanze di litotipi diversi, fra i quali sono frequenti i termini impermeabili o a bassa permeabilità come le argilliti e le marne. Le uniche aree che consentono una certa infiltrazione dell'acqua in profondità sono quelle in cui affiorano i Basalti con gli associati Calcari a Calpionelle.

L'Elba sud-orientale è caratterizzata da una successione di rocce metamorfiche, Gneiss del M. Calamita, a permeabilità complessivamente molto bassa.

Solo nella parte nord-orientale dell'Isola sono sufficientemente estese, oltre a rocce praticamente impermeabili (scisti, filladi, porfiroidi e argilliti), anche formazioni geologiche caratterizzate da una buona o discreta permeabilità per porosità secondaria, in particolare il Calcare Cavernoso e la serie Basalti - Diaspri - Calcari a Calpionelle.

Al momento attuale la maggiore risorsa idrica dell'Elba è rappresentata dalle falde presenti nei depositi alluvionali delle piccole pianure costiere, quelle di Marina di Campo, di Portoferraio, dello Schiopparello, di Marciana Marina, di Porto Azzurro e di Mola. I pozzi di queste zone forniscono circa l'80% dell'acqua distribuita dagli acquedotti comunali.

(2) Per una più dettagliata descrizione della geologia dell'Isola d'Elba si rimanda ai lavori specifici citati in bibliografia.

Queste falde, però, oltre ad avere una modesta potenzialità per il piccolo spessore e la scarsa permeabilità dei sedimenti, risultano in molte zone fortemente inquinate dall'intrusione di acqua marina conseguente all'eccessivo sfruttamento.

L'acquedotto sottomarino in costruzione fra Piombino e l'Isola d'Elba dovrebbe porre fine alla grave crisi idrica dell'Isola; sempre che nella piana del F. Cornia, dalla quale dovrebbe essere prelevata l'acqua per l'Elba, non si accentuino gli attuali problemi di quantità e di qualità. L'acqua del continente non è però destinata a raggiungere tutte le località e, d'altra parte, per alcune zone è probabilmente più economico sfruttare meglio le risorse locali. Le acque di sottosuolo rappresentano quindi una risorsa preziosa, da ricercare e utilizzare con la massima attenzione.

ANALISI DELLE IMMAGINI TERMICHE

L'interpretazione delle immagini termiche è stata fatta prevalentemente sullo slicing della banda 9-11 μ e sull'analisi armonica. Sul primo è possibile apprezzare deboli variazioni di temperatura ed osservarne la forma assai meglio di quanto non sia possibile fare sull'immagine originaria; l'analisi armonica consente di rilevare debolissime variazioni del campo di correnti in mare, determinate in alcuni casi dalla pressione dell'acqua dolce.

Complessivamente sono state osservate quasi 150 anomalie termiche associabili ad immissioni di acqua dolce in mare. Nella tavola I sono state riportate solo quelle più evidenti e di sicura interpretazione: 77 in tutto. Queste sono state distinte in due tipi: le immissioni concentrate e le diffusioni. Come vedremo, le prime corrispondono generalmente a sorgenti localizzate in corrispondenza di fratture delle rocce consolidate; le seconde o allo scarico in mare dell'acqua delle falde presenti nei sedimenti incoerenti delle piane alluvionali o alla diffusione da rocce intensamente fratturate.

Nella tavola I sono riportate anche le faglie e le fratture rilevate dall'analisi delle foto aeree (BENCINI *et al.*, 1986). Naturalmente queste sono le lineazioni che hanno maggiore evidenza morfologica e non esauriscono certo il campo delle discontinuità tettoniche esistenti, le quali, nelle rocce a permeabilità per fratturazione, coincidono generalmente con vie preferenziali di deflusso sotterraneo. Si può comunque osservare che la maggior parte delle immissioni concentrate coincide con le lineazioni rilevate.

Da Marciana Marina a Capo d'Enfola

Lungo questo tratto di costa non è stata evidenziata alcuna anomalia termica correlabile con sorgenti di una qualche consistenza. Deboli tracce si osservano nella zona di Bagno, all'Isola Paolina e sotto Monte Pinello, mentre leggere diffusioni si manifestano alle foci del Fosso dell'Acqua calda, del Fosso di Monte Castello e lungo tutto il litorale del Golfo di Procchio. È da segnalare che nessuna diffusione sembra avvenire dalla spiaggia del Golfo della Biodola.

Le rocce di questa fascia costiera sono tutte a bassa permeabilità: porfidi, serpentiniti, scisti cornubianitici e granodioriti. Solo fra Marciana Marina e Cote Tonda affiorano dei basalti termometamorfosati (anfiboliti) che hanno però una bassa densità di fratturazione, insufficiente a consentire una buona circolazione idrica.

I controlli effettuati in mare nella zona di Bagno hanno permesso di accertare che locali variazioni di temperatura sono accompagnate da variazioni proporzionali della conducibilità elettrica. In altri termini, le piccole differenze di temperatura osservabili nelle immagini termiche non sembrano attribuibili ad immissioni di acqua dolce ma, più probabilmente, al gioco delle correnti marine.

Da Capo d'Enfola a Portoferraio

Caratteristica di questo tratto di costa è l'assoluta mancanza di sorgenti localizzate, mentre sono da registrare quattro estesi, anche se deboli, fronti di diffusione: due ad est di Capo d'Enfola, uno sotto la falesia di Monte Bello, ed uno dalla spiaggia de Le Ghiaie.

Anche in questo tratto affiorano rocce a bassa permeabilità, soprattutto i porfidi e la facies marnoso-calcareo del Flysch cretaceo.

Golfo di Portoferraio

Gran parte delle anomalie termiche rilevate all'interno della rada di Portoferraio sono da attribuire a scariche urbane o industriali e non sono state riportate nella tavola I.

Anche i corsi d'acqua, come il Fosso della Concia e il Fosso della Madonnina, i cui pennacchi appaiono evidenti nelle termografie, portano, in questa stagione, solo acque di scarico. Interessante

appare però una forte diffusione di acqua in mare alle Antiche saline, con una temperatura apparente di circa 16° C ed una, assai più debole, alla foce del Fosso Fabbrello, ad ovest di Magazzini. Queste diffusioni sono evidentemente da collegare al deflusso della falda presente nei sedimenti alluvionali. La maggiore diffusione dalla zona delle Antiche saline è in accordo con la maggiore permeabilità delle alluvioni lasciate dal Fosso della Madonnina rispetto a quelle della piana di Magazzini (BENCINI *et al.*, 1986). Le immagini termiche dimostrano che l'acqua dolce defluisce in mare a dispetto della depressione della superficie freatica determinata dagli intensi emungimenti, causa dell'intrusione di acqua salata nella falda.

La costa nord-occidentale

Dal punto di vista idrogeologico questo tratto di costa è il più favorevole dell'Isola alla presenza di sorgenti sottomarine. Infatti vi affiorano quasi esclusivamente i Calcari a Calpionelle ed i Diaspri, entrambi permeabili per fratturazione, e l'assetto strutturale della successione Basalti - Diaspri - Calcari a Calpionelle, nel complesso una monoclinale immergente ad ovest, favorisce il deflusso delle acque di sottosuolo verso il mare.

Le immagini termiche non hanno però fornito elementi per localizzare sorgenti concentrate di grossa portata, ma molti fronti di diffusione, di cui uno assai esteso alla base della falesia sottostante il Monte Pietre Rosse.

Alcune sorgenti localizzate sono state rilevate sotto Monte Grosso, la più evidente delle quali sgorga a nord di Cala Mendolina, dove è stata rilevata una temperatura di circa 16° C. Qui, in corrispondenza di due fratture nei Calcari a Calpionelle presso il contatto con i Diaspri, si è misurata una punta minima della conducibilità elettrica dell'acqua, con un valore di 1500 microSiemens inferiore a quello dell'acqua circostante, ed una temperatura di soli 0,3° C minore. Si può quindi valutare che l'acqua marina sia diluita con circa il 4-5% di acqua dolce.

La mancanza di sorgenti localizzate di grossa portata può essere spiegata dall'assenza, nei Calcari a Calpionelle, di un carsismo in fase avanzata. Occorre ricordare, infatti, che le grosse sorgenti sottomarine individuate nelle aree con rocce carbonatiche, ad esempio in Puglia (BOLTRI, GUGLIELMINETTI e MARINO, 1975), sono sempre

correlate ad un carsismo ben sviluppato, per cui le sorgenti sottomarine corrispondono alla fuoriuscita di veri e propri corsi d'acqua sotterranei.

Nei Calcari a Calpionelle, ed ovviamente nei Diaspri, la circolazione idrica è evidentemente diffusa nelle piccole fratture e manca il drenaggio sotterraneo da parte di grossi canali. Questo può spiegare l'esistenza di estesi fronti di diffusione, mentre le sorgenti localizzate sembrano avere portate tutto sommato modeste.

Da Capo Vita a Punta delle Cannelle

Tra Capo Vita e Capo Castello vi è una piccolissima sorgente in corrispondenza di una vallecchia che scende dal Monte Lentisco.

Nella zona di Cavo ci sono due evidenti anomalie termiche: una ha le caratteristiche di un fronte di diffusione alla foce del Fosso Baccetti, l'altra, situata in corrispondenza di una frattura a nord di Punta delle Paffe, evidenzia una delle più cospicue sorgenti trovate lungo le coste dell'Elba, con una temperatura apparente del mare di circa un grado più bassa di quella dell'area circostante.

A Punta delle Paffe affiora il Calcare Massiccio, che risulta interessato da cavità carsiche; una vecchia opera di presa prelevava, anni addietro, acqua dolce dentro una grotta che sbocca in mare a pelo d'acqua. Quest'opera è attualmente abbandonata, mentre un pozzo perforato a circa 100 metri dal mare capta presumibilmente la stessa acqua.

In questo punto i controlli in mare hanno permesso di rilevare un minimo molto localizzato della conducibilità elettrica a circa 20 metri dalla riva: 4090 μS rispetto ai 4400 μS dell'intorno. Dato il piccolo scarto di temperatura registrato al momento del controllo in mare (0,2° C), si può ritenere che in quel punto l'acqua del mare fosse diluita da un 8-10% di acqua dolce.

Altre piccole sorgenti vengono evidenziate a Capo Pero, in corrispondenza di una frattura, e a nord e a sud di Rio Marina. Le rocce affioranti in questo tratto di costa sono tutte a bassa permeabilità: argilloscisti, arenarie quarzifere, anageniti, porfiriodi e scisti porfirici, skarn.

Nello specchio d'acqua antistante la spiaggia di Ortano è invece evidente una diffusione di acqua dolce che si spinge per alcune centinaia di metri verso il largo. Questa piccola spiaggia corrisponde

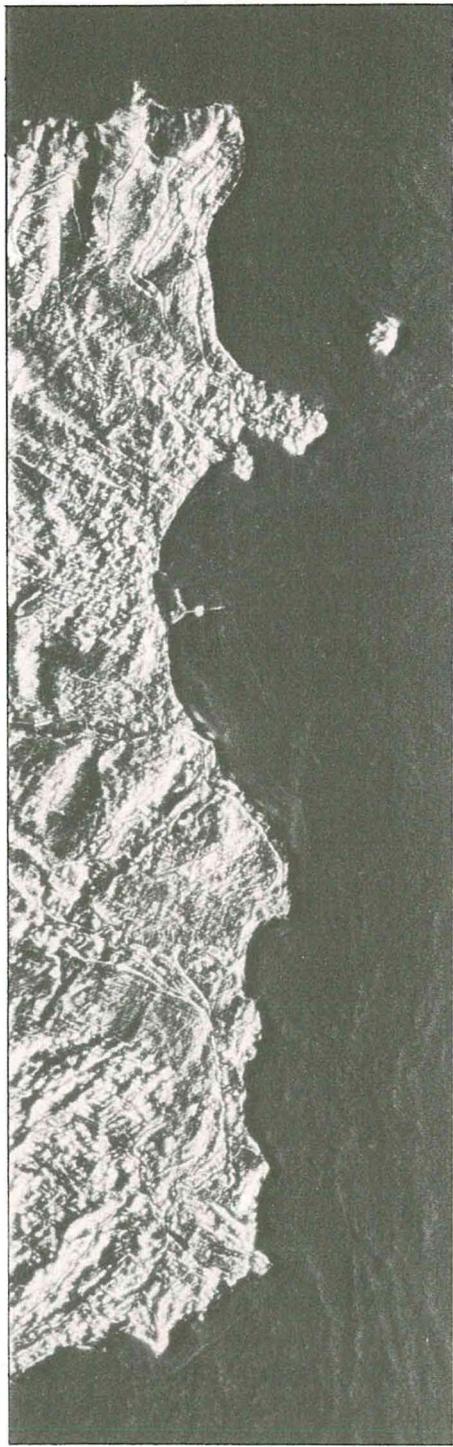
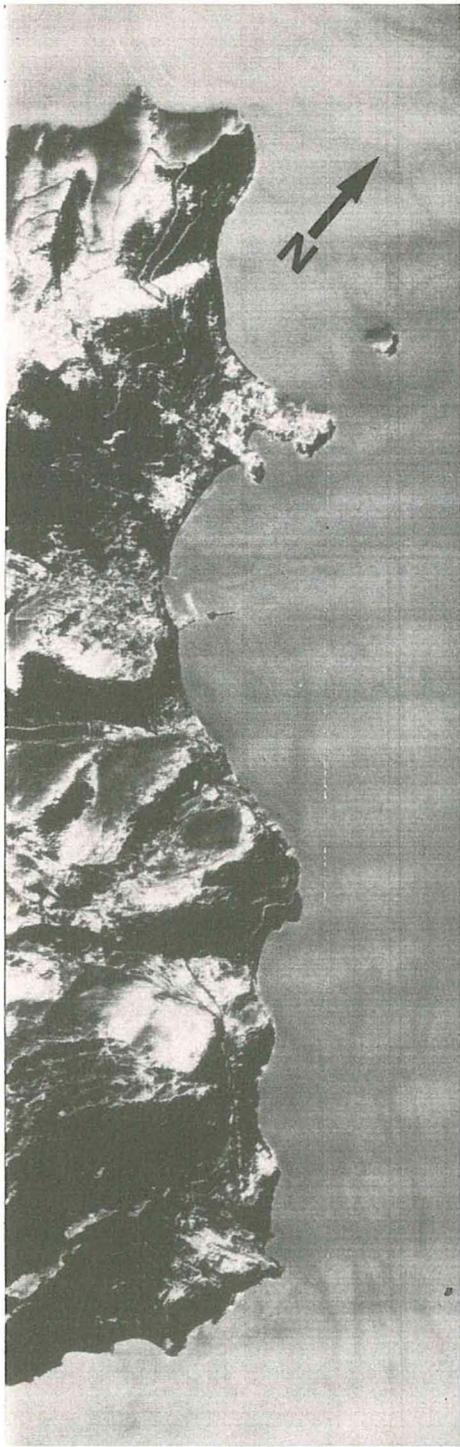


Fig. 2 - Slicing (in alto) e analisi armonica (in basso) della banda 9-11 μ della costa in prossimità di Cavo. Si nota, a sud del pontile, la diffusione alla foce del fosso Baccetti e la sorgente di Punta delle Paffe. (Concessione S.M.A. n. 058 del 13/1/86).

alla parte terminale della stretta valle del Rio d'Ortano. Le immagini termiche dimostrano che i depositi alluvionali di questa valle consentono un deflusso sotterraneo consistente, che potrebbe essere sfruttato con pozzi poco profondi.

Il Golfo di Porto Azzurro

Questo golfo è circondato dagli scisti cornubianitici con quarziti (Gneiss del M. Calamita) praticamente impermeabili. Infatti fra Punta delle Cannelle e Forte Focardo non è stata rilevata alcuna sorgente in mare, ma solo deboli diffusioni presso la foce di alcuni fossi che sfociano nella parte meridionale del Golfo.

In corrispondenza del laghetto della Miniera Terra Nera, separato dal mare da un sottile tombolo di ciottoli e ghiaia, non sono rilevabili anomalie termiche; ciò significa che non vi sono scambi consistenti d'acqua fra il laghetto e il mare.

La costa sud-orientale

Sul lato orientale del Monte Calamita è rilevabile una sola immissione, di modesta entità, a Punta Bianca, mentre deboli diffusioni si notano dalla spiaggia situata a sud di Punta Perla e un'evidente deformazione del campo delle correnti appare al largo di Capo Calvo. Anche in questa zona la posizione dell'anomalia termica è correlabile con quella di una frattura, ma la sua forma fa pensare al rimescolarsi di acque di diversa provenienza al largo del promontorio più che alla presenza di una sorgente sottomarina. Inoltre, anche in questo tratto di costa affiora lo Gneiss del M. Calamita, dal quale è ragionevole non attendersi consistenti deflussi di sottosuolo.

La costa meridionale

In corrispondenza della Punta di Vallemorta c'è una evidente anomalia termica che si estende per 300 o 400 metri verso sud-ovest (Fig. 1).

Sempre concentrate, ma di ben minori dimensioni, sono le sorgenti in prossimità della spiaggia di Remaiolo e della Punta Rossa.

Assai interessante è il tratto di mare antistante Punta del Praticciolo, dove sembra emergere una certa quantità di acqua dolce da vari punti ad una distanza di 100-500 metri dalla costa. Queste sorgenti sono forse da collegare con la presenza, sul fondo marino, dei Calcari dolomitici termometamorfosati, in continuità con quelli che affiorano fra Poggio Polveraio e Punta della Calamita.

Nel tratto successivo, fino al Golfo di Lacona, non vi sono che debolissime tracce di diffusione. Nello stesso Golfo sembrano esservi poche perdite dall'entroterra; l'unica di una qualche consistenza è ad ovest della Punta della Contessa, in corrispondenza di una frattura nelle arenarie del Flysch cretaceo.

Analoga situazione si presenta nel Golfo di Campo: la stessa spiaggia, la più lunga di tutta l'Isola, non sembra interessata da fenomeni di diffusione verso il mare. Anche per questa spiaggia vale quanto detto per quelle che si affacciano sulla rada di Portoferraio: la depressione della superficie freatica al di sotto del livello del mare favorisce più l'intrusione dell'acqua salata nei sedimenti incoerenti che lo scarico in mare delle acque di falda.

La costa occidentale

Lungo tutta la costa che gira, da sud a nord, intorno al Monte Capanne affiora quasi esclusivamente la Granodiorite, che presenta, come si è detto, un basso grado di permeabilità. Le immagini termiche mostrano in effetti che non vi sono consistenti deflussi di acqua dolce in mare.

Procedendo da Capo di Poro verso ovest, si incontrano alcune deboli sorgenti sotto il Monte Turato e il Colle Palombaia, costituiti dalle rocce del Flysch cretaceo.

Una debolissima diffusione è presente alla foce del Fosso di Cavoli, mentre non sembra esservene dalla spiaggia di Fetovaia.

Da Cavoli fino a Pomonte non si incontra nessuna traccia di sorgente, né concentrata né diffusa; solo in prossimità di quest'ultima località si ha una debole dispersione, controllata anche con misure di conducibilità elettrica sul posto.

A nord di Pomonte, per tutta la costa fino a Marciana Marina, sono presenti evidenti tracce di diffusione, in particolar modo all'estremità occidentale dell'Isola, che però le misure in mare non hanno permesso di verificare.

Le uniche sorgenti localizzate sembrano essere quelle evidenziate ad ovest di Punta della Madonna, in corrispondenza di alcune fratture nei Porfidi e nelle Anfiboliti gabbriche.

CONCLUSIONI

Nessuna delle anomalie termiche rilevate in mare lungo le coste dell'Isola d'Elba è riferibile a grandi immissioni di acqua dolce in mare, tanto che non è mai stato possibile effettuare il calcolo della portata sulla base dello scambio termico fra acqua di mare ed acqua dolce immessa (GANDINO e TONELLI, 1983). Nella maggior parte dei casi si tratta di anomalie di piccola entità, qualcuna al limite della interpretabilità.

Le misure dirette di temperatura e di conducibilità elettrica dell'acqua marina hanno consentito di accertare la fuoriuscita di acqua dolce in corrispondenza delle anomalie maggiori, mentre alcune delle minori controllate hanno dato esito negativo.

Occorre notare, a questo proposito, che l'identificazione di anomalie termiche per mezzo di immagini telerilevate si avvale di una precisione dello stesso ordine di grandezza di quella ottenuta con i controlli a mare, ma si basa su di un numero notevolmente superiore di punti misurati. Non è quindi da escludere che i controlli effettuati non siano sempre stati in grado di rendere giustizia al lavoro svolto per mezzo del telerilevamento, anche in considerazione delle condizioni meteomarine non ottimali avutesi durante la campagna di misure.

In alcuni casi si è comunque potuto verificare che piccole differenze di temperatura misurate fra punti vicini non erano accompagnate da una diversa salinità dell'acqua: si può quindi ritenere che anomalie termiche di piccola entità, quali quelle telerilevate in alcuni punti intorno all'Isola, non corrispondano sempre ad immissioni di acqua dolce, ma possano dipendere anche dal gioco delle correnti marine.

D'altro canto, in qualche caso si è misurata una netta diluizione dell'acqua marina, non accompagnata da un altrettanto netta diminuzione della temperatura. Questo può essere spiegato con il diverso periodo in cui sono state riprese le immagini termiche rispetto a quello in cui sono state effettuate le misure in mare: le prime in condizioni di massimo contrasto termico fra l'acqua marina e quel-

la di sottosuolo, ma di minima portata delle sorgenti, le seconde con portate maggiori ma con minore differenza termica.

Alcuni dubbi permangono sull'interpretazione dei fronti di diffusione evidenziati solamente dall'analisi armonica e in alcune zone in cui la geologia a terra sembra dare scarso credito alla loro presenza. Riprese ripetute in condizioni del mare ottimali, o con diversa provenienza del moto ondoso, dovrebbero permettere di valutare se queste forme sono realmente dovute ad immissioni diffuse di acqua dolce e non invece a correnti innescate dal moto ondoso sotto costa. L'entità di queste immissioni sarebbe comunque talmente modesta che una ripetizione del volo sarebbe motivata solo dalla necessità di mettere a punto la metodologia d'indagine e non certo dall'interesse pratico dei risultati ottenibili.

Analogo discorso può essere fatto per una eventuale ripetizione del volo in un periodo di maggiore scarico delle falde idriche (primavera): oltre ad una migliore verifica del metodo, questo porterebbe certamente un contributo alla più completa comprensione dell'idrogeologia dell'Isola, ma sarebbe di scarso aiuto per la soluzione dei problemi reali, che vedono la necessità di reperire risorse idriche proprio nel periodo estivo. Da quest'ultimo punto di vista si può affermare che, sebbene non siano state individuate sorgenti direttamente utilizzabili, lo studio ha permesso l'acquisizione di elementi utili, a completamento delle indagini idrogeologiche condotte a terra (BENCINI *et al.*, 1986).

In particolare si è avuta la verifica della scarsa infiltrazione nelle rocce dell'Isola d'Elba, a conferma della bassa permeabilità della maggior parte delle unità geologiche affioranti. Le eccezioni sono rappresentate dal Calcare Massiccio, che però si affaccia al mare solo in un piccolo tratto di costa, e dalla serie Calcari a Calpionelle - Diaspri, che affiora lungo la costa nord-orientale.

Dai Calcari a Calpionelle e dai Diaspri si hanno diffusioni di acqua dolce in mare piuttosto che sorgenti concentrate di grande portata, probabilmente perché nei Calcari lo sviluppo del carsismo è ancora ad uno stadio giovanile per cui la circolazione avviene in un reticolo fitto di sottili fratture e non in corrispondenza di grossi canali di dissoluzione.

Infine, le immagini termiche hanno permesso di verificare che dalle pianure costiere non si hanno consistenti dispersioni in mare dell'acqua di falda.

BIBLIOGRAFIA

- BARBERI F., DALLAN L., FRANZINI M., GIGLIA G., INNOCENTI F., MARINELLI G., RAGGI G., SQUARCI P., TAFFI L., TREVISAN L. (1969) - Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 126 Isola d'Elba. Min. Ind. Comm. e Art., Roma, 41 pp.
- BENCINI A., GIARDI M., PRANZINI G., TACCONI B.M. (1986) - Le risorse idriche dell'Isola d'Elba. Amm. Prov. di Livorno. Ed. Tacchi, Pisa, 80 pp.
- BENEÓ F., TREVISAN L. (1943) - I lineamenti tettonici dell'Isola d'Elba. *Boll. Uff. Geol. It.*, **68**, 7-18, Roma, 1945.
- BOLTRI R., GUGLIELMINETTI M., MARINO C.M. (1975) - Remote sensing techniques applied to the study of fresh water springs in coastal areas of southern Italy. *Proc. 10th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, Michigan.
- DALU G., ULIVIERI C., VIOLA A. (1982) - Effetto dell'emittanza della superficie sulla temperatura telerilevata. *Atti IV Congr. Naz. sul Telerilevamento delle risorse terrestri*. S.I.T.E., 129-145.
- GANDINO A., TONELLI A.M. (1983) - Recent remote sensing technique in fresh water submarine springs monitoring: qualitative and quantitative approach. *Int. Symp. on Methods and instrumentation for the investigation of groundwater systems*. Noordwijkerhout, 301-310.
- LECHI G.M., TINCATI M. (1975) - Quantitative evaluation of the minimum fresh water spring flow in the sea by means of thermal surveys. *Proc. 10th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, Michigan.
- MARINELLI G. (1959) - Le intrusioni terziarie dell'Isola d'Elba. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem.*, Ser. A, **72**, 50-253.
- MARINO C.M. (1975) - Applicazioni delle teleosservazioni (I. R. termico e riprese multi-spettrali) nel campo delle risorse idriche in Italia. *Atti XV Conv. Int. Tecnico Scientifico sullo Spazio*, Roma.
- MAZZANTI R. (1983) - Il punto sul Quaternario della fascia costiera e dell'arcipelago di Toscana. *Boll. Soc. Geol. It.*, **102**, 419-556.
- PRABHAKARA C., DALU G. (1976) - Remote sensing of the surface emissivity at 9 μ over the globe. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3719-3724.
- PERRIN M. (1975) - L'Île d'Elbe et la limite Alpes-Appennin: données sur la structure géologique et l'évolution tectogénétique de l'Elbe alpine et de l'Elbe apennine. *Boll. Soc. Geol. It.*, **94**, 1924-1955.
- RAGGI G., SQUARCI P., TAFFI L. (1965) - Considerazioni stratigrafico-tettoniche sul flysch dell'Elba. *Boll. Soc. Geol. It.*, **84**, 1-13.
- TERMIER P. (1909) - Sur les nappes de l'Île d'Elbe. *C. R. Ac. Sc.*, Paris, 148 pp.
- TREVISAN L. (1950) - L'Elba orientale e la sua tettonica di scivolamento per gravità. *Mem. Ist. Geol. Univ. di Padova*, **16**, 3-39.
- SWIFT C.T., MC INTOSH R.E. (1983) - Consideration for Microwave Remote Sensing of Ocean-Surface Salinity. *I.E.E.E. Trans. Geoscience and Remote Sensing*, **GE 21**, 480-490.

(ms. pres. il 15 marzo 1986; ult. bozze il 30 marzo 1987)