

# l'esplorazione geofisica

Emanuele Bozzo



▲ *Equipaggiamento radar per la misura dello spessore del ghiaccio utilizzato dagli Stati Uniti, dalla Gran Bretagna e da altri paesi Occidentali fino alla fine degli anni '70 (da: Bogorodsky et al., 1985)* ►



## La geofisica, la calotta glaciale e le terre sotto di essa

All'inizio del nostro secolo la configurazione generale del continente antartico era stata completamente delineata e sembrava che al suo interno ci fosse ben poco da vedere se non un'immensa calotta glaciale. Ma quanto era profondo questo ghiaccio e qual'era la disposizione delle masse terrestri al di sotto di esso? Uno dei primo ricercatori a porsi il problema della prospezione geofisica del "subglaciale" fu Mawson, il quale data la sufficiente differenza nelle proprietà elastiche tra il ghiaccio e la roccia sottostante, proponeva già nel 1919 un eco-sonar opportunamente modificato per misurare lo spessore della calotta glaciale. L'idea, che cinquant'anni dopo si concretizzò nella tecnica GPR (Ground Probing Radar) oggi la più usata per studi glaciologici in Antartide, in quei tempi non ebbe seguito ma suggerì a Byrd nella sua seconda spedizione antartica l'uso del sondaggio sismico, tecnica già in uso nell'industria petrolifera americana dal 1930. Questa tecnica, nelle sue prime applicazioni in Antartide, venne comunque utilizzata solo in aree costiere e con scarsi risultati. Il primo successo nell'uso della sismica si ebbe nel corso della spedizione Norvegese-Anglo-Svedese 1951-52 con i suoi 650 km di profili sismici attraverso le montagne della Queen Maud Land fino al plateau polare. Lo spessore massimo di ghiaccio misurato fu di 2400 m. Dopo l'Anno Geofisico Internazionale (1957-58) che aveva avuto come principale obiettivo l'osservazione geofisica sinottica, ma che aveva anche visto lo sviluppo di indagini di esplorazione geofisica crostale, l'uso del metodo sismico divenne generale. Molti di questi dati erano

comunque affetti da errori grossolani dovuti agli effetti di disturbo dell'esplosione nel ghiaccio a temperature al di sotto dei -25°C. Attualmente le nuove tecniche di perforazione del ghiaccio ed il miglioramento delle apparecchiature di misura ha diminuito notevolmente questi inconvenienti aumentando parallelamente i costi dei rilievi, specie quando si confrontano con altre tecniche come quelle RES (Radio Echo Sounding) che possono produrre profili quasi continui di spessore del ghiaccio da un veicolo terrestre od aereo. Questa nuova tecnica, introdotta in Antartide nell'ultimo ventennio, impiega onde elettromagnetiche in radio-frequenza in luogo delle onde elastiche. Il ghiaccio si comporta in modo trasparente al percorso di questi segnali elettromagnetici che invece vengono riflessi dal sottostante basamento roccioso, da qui è possibile inviare nel ghiaccio questi impulsi e riceverne l'eco dal fondo come in buona approssimazione si ottiene in mare dagli scandagli ultrasonici.

Le misure gravimetriche forniscono un valido supplemento al sondaggio sismico, dato il forte contrasto di densità tra ghiaccio e basamento roccioso. Sebbene la precisione possa essere anche lontana da quella del metodo sismico, il metodo gravimetrico è attualmente largamente usato per interpolare i dati sismici.

La conoscenza dell'altezza della superficie della calotta non è solo di interesse in sé ma è anche necessaria per la determinazione della topografia subglaciale.



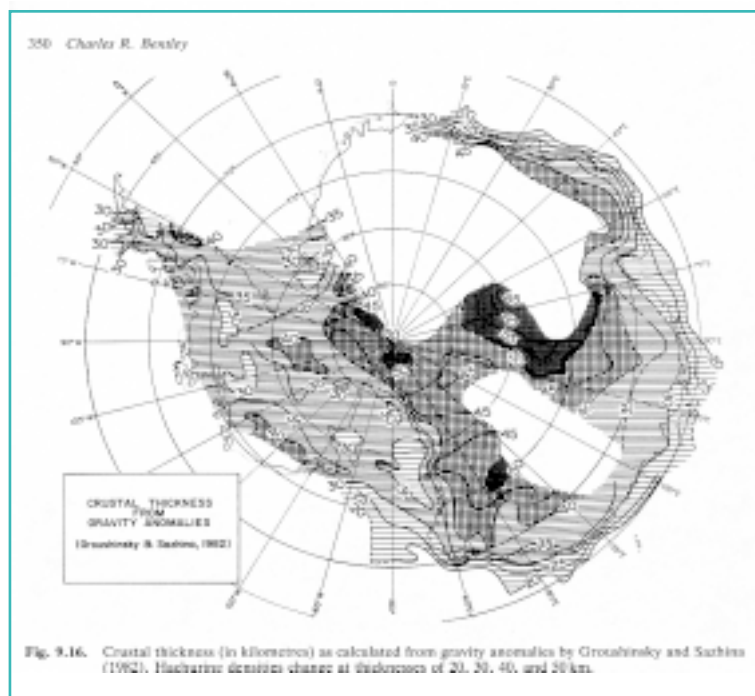
### Configurazione geofisica e struttura della crosta antartica

La conoscenza della topografia subglaciale e la struttura della crosta antartica è stata sostanzialmente migliorata a partire dal 1950. Prima di quell'anno era nota solo la configurazione generale della copertura di ghiaccio principalmente lungo la costa del Mare di Ross e particolarmente lungo la penisola antartica. All'interno del continente nessuna misura della struttura crostale era stata ancora effettuata soprattutto a causa della limitata capacità di trasporto delle apparecchiature geofisiche su slitta. La prima traversa scientifica all'interno con veicoli motorizzati fu condotta dalla già citata spedizione norvegese-anglo-svedese; essa segnò l'inizio delle investigazioni geofisiche e glaciologiche dell'interno del continente antartico. Diversi metodi geofisici, come quello sismico, gravimetrico e magnetico, forniscono informazioni circa la struttura crostale. Le velocità delle onde sismiche nelle rocce subglaciali e lo spessore degli strati sono determinate dalle tecniche di rifrazione sismica. Il campo gravimetrico, determinato in luoghi dove è conosciuto lo spessore del ghiaccio, può essere utilizzato per stimare lo spessore crostale. Le misure del campo geomagnetico insieme a quelle della suscettività magnetica informano sulla composi-



▲ Misure gravimetriche sul Mount Melbourne (Terra Vittoria Settentrionale)

zione delle rocce. Anomalie magnetiche a piccola lunghezza d'onda consentono di stimare la profondità del basamento magnetico che usualmente viene assunto coincidente con la base del bacino sedimentario subglaciale. Uno degli aspetti più importanti dei rilievi geofisici è quello inerente la "georeferenziazione" dei dati, ovvero l'indispensabile localizzazione geografica e topografica dei punti di misura da cui deriva la precisione dei risultati. Oggi i problemi del rilevamento topografico a terra, dei punti-nave in mare e della radiolocalizzazione aerea sono stati risolti efficacemente dal sistema di posizionamento satellitare GPS (Global Positioning System). Esso ha permesso di ottimizzare le tecniche di acquisizione dei dati in modo da rendere possibile il completamento di aree di rilievo anche molto estese nel corso di una singola campagna antartica. La crosta terrestre è fondamentalmente diversa sotto l'Antartide occidentale ed orientale. L'Antartide orientale è verosimilmente continentale, mentre quella occidentale è una specie di "terra di bordo" ("border-land") sulle cui caratteristiche geologiche si dibatte tuttora. Lo spessore medio crostale dell'Antartide occidentale è di circa 25-30 km a paragone di quello orientale che può raggiungere i 40 km. Il confine tra le due Antartidi è marcato dalla precipitosa caduta delle quote topografiche al fronte delle Montagne Transantartiche e dalle evidenze geofisiche che indicano una variazione rapida dello spessore crostale.

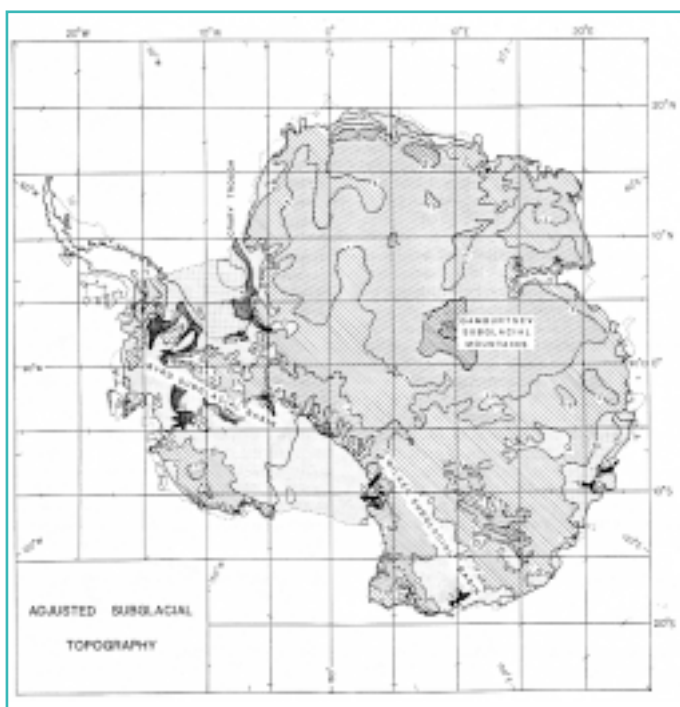


▲ La mappa mostra il limite netto tra l'Antartide orientale e quella occidentale. Questa figura è stata ottenuta mediante una relazione lineare tra le profondità della discontinuità crosta-mantello (Moho) e l'anomalia gravimetrica media (di Bouguer) (da Groushinsky e Sazhina, 1982)

La migliore informazione sulla struttura crostale profonda viene fornita dai profili a rifrazione sismica profonda e dai rilievi gravimetrici. Da un capo all'altro dell'Antartide occidentale, la superficie del basamento, associato alle velocità sismiche di 5.7-6.4 km/s, giace da 2 a 4 km al di sotto del livello del mare, quello dell'Antartide orientale è stato trovato invece vicino al livello del mare. Le anomalie gravimetriche dimostrano anch'esse una marcata differenza nello spessore crostale tra l'Antartide occidentale ed orientale.



▲ *Installazione di apparecchiature geofisiche sull'apparato vulcanico del Mount Erebus (da: Kaminuma, 1988)*



Nonostante questa configurazione generale della crosta antartica sia ormai chiara, le informazioni di dettaglio sono disponibili solo su aree troppo ristrette. Alla geofisica compete ancora un vasto programma di esplorazione all'interno del continente, esso si sta sviluppando mediante studi di rifrazione e riflessione sismica, di aerogeofisica comprendente aeromagnetismo, aerogravimetria, radar ed una piena utilizzazione di dati gravimetrici e magnetici satellitari.

### Sismicità ed isostasia

L'utilizzo nel metodo sismico di esplorazione delle onde elastiche prodotte da esplosioni nel ghiaccio, in fori di sonda profondi anche una cinquantina di metri con cariche che possono raggiungere anche due tonnellate, sarebbe oltremodo ridotto, con evidenti vantaggi tecnici ed economici, se invece o congiuntamente a queste onde artificiali l'esplorazione profonda potesse avvalersi delle sorgenti di energia elastica naturale fornite dai terremoti. Ma l'Antartide è il continente con la sismicità più bassa in assoluto; nessun terremoto con magnitudo superiore a 6 vi è stato mai registrato. Questo fatto è stato variamente attribuito ad assenza di stress, all'azione del carico della calotta glaciale (ice-load), alle basse temperature ed alle basse velocità di spostamento delle placche. Le piccole scosse locali sono state associate al vulcanismo ed agli ice-quakes, ovvero agli intensi fenomeni di fratturazione dei ghiacci e solo occasionalmente all'azione tettonica. Solo 11 sismi (tre di essi dubbi) con magnitudo superiore a 4 hanno avuto epicentri antartici.

Un'altra peculiarità geofisica del continente antartico è quello riguardante l'isostasia glaciale che studia gli effetti di abbassamento della crosta antartica entro il supporto plastico su cui galleggia a causa del peso del ghiaccio sovrastante. E' stato calcolato che il potenziale isostatico di sollevamento corrispondente alla totale rimozione della calotta di ghiaccio ha un massimo di 950 m all'interno del bordo orientale del continente (Wilkes Land) ed è di circa 500 m al centro dell'Antartide occidentale.

▲ *La mappa di rimbalzo isostatico di Drewry mostra che un innalzamento di circa 150 m si verificherebbe nelle aree costiere dove lo spessore di ghiaccio è di circa 1 km. Come semplice approssimazione, 30 m di rimbalzo corrisponderebbero a circa 200 m di ghiaccio da cui conseguirebbe un ritiro del limite della calotta di circa 20 km (da: Bentley, 1992)*





## La caratterizzazione geofisica della piattaforma continentale

La piattaforma continentale antartica è la più profonda del mondo, infatti la sua profondità media è di circa 500 m ma in alcuni punti essa può superare il chilometro. Essa ha inoltre una topografia molto irregolare e degrada frequentemente e sorprendentemente verso il continente. Quest'ultimo aspetto è in relazione agli effetti dell'isostasia glaciale, ai fenomeni erosivi ed in alcune aree all'incapacità della sedimentazione di prevalere sulla subsidenza. Durante quest'ultimo ventennio continue ricerche geofisiche hanno esplorato il fondo marino dell'Antartide, ma solo dal 1977 con le tecniche sismiche multicanale ed il crescente interesse per le potenziali riserve di idrocarburi, si è ottenuta una prima anche se parziale copertura di misure sulla piattaforma continentale antartica. Aldilà dell'interesse economico tali investigazioni stanno fornendo indispensabili informazioni sull'evoluzione tettonica di queste piattaforme, sulla storia climatica del continente e sui processi sedimentologici. Le prime ricerche nel Mare di Ross furono condotte dagli USA con la nave Eltanin in grado di produrre dati sulla piattaforma con tecniche non solo sismiche ma anche gravimetriche e magnetiche. Questi dati hanno fornito le basi e la scelta dei siti di uno dei più importanti programmi di perforazione: il Deep Sea Drilling Project (DSDP).



*Profili sismici nel Mare di Ross  
effettuati dalla S.P. Lee (USA).  
La sezione sismica taglia il contatto  
tra crosta continentale (a sinistra) e  
crosta oceanica (a destra)  
(da: Eittrheim e Hampton, 1987)*

## Esplorazione geofisica italiana in Antartide

Per l'Italia la prima occasione di eseguire studi geofisici in Antartide si presentò, nell'estate australe 1957/58, con il tenente di vascello F. Faggioni, il quale eseguì osservazioni sismiche e magnetiche presso la Base Scott. A questa prima esperienza seguì quella del geologo M. Manzoni che, a partire dal 1973-74, intraprese studi paleomagnetici da lui successivamente proseguiti nel corso delle prime Spedizioni italiane. Nel marzo del 1980 la Società Geografica Italiana tenne un convegno sull'Antartide con lo scopo di sensibilizzare l'opinione pubblica e le autorità sull'opportunità di aderire al Trattato Antartico stipulato nel 1959 durante l'Anno Geofisico Internazionale ed entrato in vigore nel 1961. A partire dall'approvazione della legge n.285 del 1984 si attivò il programma di ricerche scientifiche in Antartide (PNRA). Ne scaturì un progetto multidisciplinare in cui, almeno sino al 1989, le aree scientifiche interessate alle attività di ricerca riferibili a discipline geofisiche, risultavano inserite nei programmi di: Cosmogeofisica, Fisica dell'Atmosfera e Climatologia, Scienze della Terra,

Oceanografia Fisica, Geofisica a mare. La distinzione fra Geofisica della "Terra Solida" e Geofisica della "Terra Fluida", nonché la considerazione che i temi di cosmogeofisica attivati risultavano più strettamente attinenti a quelli di Cosmologia e Cosmogeochimica, hanno condotto negli anni successivi a restringere il campo di interesse della Geofisica di esplorazione in Antartide alle ricerche sviluppate dal Gruppo delle Scienze della Terra e dalla Geofisica in mare. Tali ricerche sviluppate sul continente antartico, si propongono di definire le caratteristiche geofisiche mediante piattaforme di osservazione mobili o fisse, nello spazio e nel tempo. Si delineano in tal modo approcci metodologici diversi ma integrati sull'obiettivo finale della conoscenza di storia, struttura ed evoluzione del continente. Si sono quindi individuati quattro indirizzi principali, tuttora attivi: a) esplorazione geofisica in mare; b) esplorazione geofisica a terra, per studi geologico-strutturali e geodinamici; c) geofisica di osservatorio e reti geofisiche; d) geofisica applicata alla glaciologia, alla fisica del ghiaccio ed ai cambiamenti globali.

## Le tecniche geofisiche

Per l'esplorazione geofisica a largo raggio ovvero quello rivolta allo studio della struttura geologica subglaciale e profonda sono stati attivati dal PNRA in Antartide: rilievi di sismica a rifrazione e riflessione, rilievi magnetici, rilievi gravimetrici. Essi hanno quasi sempre operato lungo transetti geologicamente significativi ed hanno dovuto risolvere problemi in parte comuni, come ad esempio, a terra, la misura dello spessore del ghiaccio (tecniche RES) ed in mare, la navigazione fra i ghiacci ed il recupero dell'apparecchiature fuori bordo.

Per gli osservatori geofisici e le "reti fisse", è necessario distinguere tra postazioni nell'area della Base e remotizzate. Tra le prime figurano osservatori come quelli geomagnetico, sismico a larga banda e di gravimetria assoluta, per citare quelli attivi presso la Base italiana. Tra le seconde figurano ad es. la rete geodetica (di deformazione), quella gravimetrica, sismica e magnetica che si differenziano dalle "reti mobili" in quanto queste ultime riguardano installazioni temporanee (della durata di una spedizione) a monitoraggio continuo. Rete di questo tipo è quella GDS (Geomagnetic Depth Sounding) che usa lo studio delle magnetovariazioni per l'indagine delle strutture di



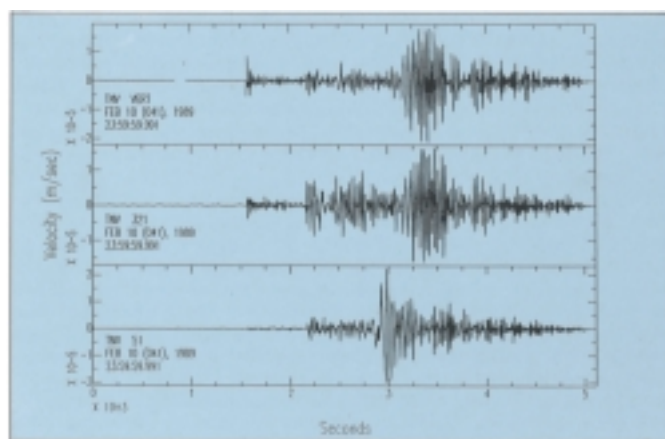
◀ La stazione sismica presso la base italiana di Baia Terra Nova e la strumentazione per i rilievi sismici a larga banda in galleria (da: Boschi e Meloni, 1991)

Sismogramma relativo ad un terremoto molto distante registrato dalla stazione sismica di Baia Terra Nova (da: Boschi e Meloni, 1991) ▶

## conducibilità litosferiche

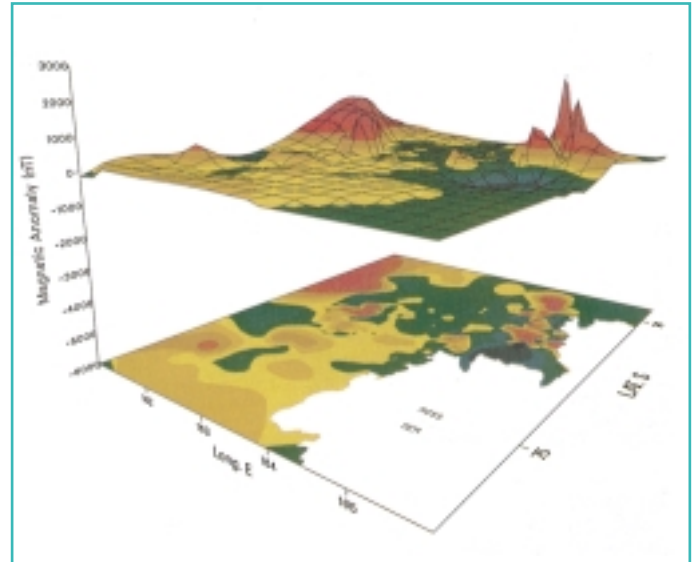
Considerate le particolari condizioni operative che si riscontrano in Antartide, i rilievi geofisici al suolo, risultano particolarmente onerosi e la loro produttività necessariamente bassa. Essi trovano quindi il loro naturale completamento nei rilievi eseguiti direttamente da aeromobile, che permettono in tempi ridotti l'esplorazione dettagliata di aree molto estese. Recentemente alcune compagnie, principalmente canadesi e statunitensi, hanno sviluppato tecniche e strumentazione per rilievo da elicottero. L'elicottero scelto per i rilievi italiani dal 1990 in poi ha un' autonomia 3h 45', ed una velocità max. di 190 km/h in configurazione di misura.

Oggi la moderna esplorazione aeromagnetica e radar sviluppata dal PNRA costituiscono non solo uno strumento avanzato per la conoscenza del sottosuolo ma rappresentano anche un campo tecnologico in grado di promuovere e stimolare sviluppi in altri campi strategici come il trattamento dati e più in generale nella informatica applicata.





▲ Il Mount Melbourne sempre ben visibile dalla Base italiana



▲ Anomalie del campo magnetico terrestre della zona intorno alla Base italiana. In alto ed all'estrema destra si possono individuare le diverse curve in corrispondenza del vulcano Melbourne (nella foto a sinistra) (da: Boschi e Meloni, 1991)

### La geofisica e la questione del potenziale minerario

Attualmente le moderne tecnologie di esplorazione geofisica sono principalmente rivolte allo studio delle caratteristiche geologico-strutturali dell'Antartide. Esse però stanno sviluppando piattaforme di osservazione avanzate in prospettiva di un interesse minerario sulle risorse di questo remoto continente. Nuove tecniche gravimetriche mediante strumentazione aerotrasportata (aerogravimetria) sono già state eseguite nel Mare di Weddel ed nella Penisola antartica utilizzando accurate procedure di navigazione satellitare. L'esplorazione radio-echo della calotta glaciale con l'impiego di aerei ha consentito di fornire non solo misure continue del substrato glaciale ma un valido supporto ad altre tecniche

aerogeofisiche di prospezione come quelle aeromagnetiche. La grande espansione di queste ultime insieme alle moderne tecniche di sismica a riflessione marina multicanale (CDP) ed ai progetti di perforazione hanno rimarcato nell'ultimo decennio la grande espansione della ricerca geofisica e geologica sui margini continentali dell'Antartide, ove potrebbero esistere potenziali risorse petrolifere. E benchè nessuna di tali risorse è nota in Antartide nè alcuna industria petrolifera sia attualmente interessata al suo reperimento, per gli enormi costi e rischi che coinvolgono il suo sfruttamento, non è da escludere che i futuri sviluppi delle tecnologie e mutate considerazioni economiche e politiche possano riconfigurare il problema.

*I testi e le foto sono di Emanuele Bozzo  
Dipartimento di Scienze della Terra  
Università degli Studi di Genova  
v.le Benedetto XV, 5  
16132 - GENOVA*

*Per un approfondimento degli argomenti trattati è possibile consultare l'Autore o rivolgersi alla Sezione dell'MNPA di Genova.*