

VALUTAZIONE DEL MANTO NEVOSO MEDIANTE OSSERVAZIONI DA SATELLITE

I satelliti meteorologici, mediante la loro capacità di riprendere immagini della superficie terrestre, offrono la possibilità di valutare l'estensione del manto nevoso e di sorvegliarne l'evoluzione. In particolare, i satelliti in orbita polare, che hanno la proprietà di poter esplorare l'intera superficie terrestre due volte al giorno, offrono possibilità operative (vastità del campo di osservazione, sistematicità ed omogeneità delle osservazioni per lunghi periodi di tempo, puntualità della disponibilità dei dati) praticamente irraggiungibili da qualunque rete di osservazione terrestre, tenuto conto anche delle disagiate condizioni climatologiche ed orografiche delle località di cui è desiderabile l'osservazione del manto nevoso.

L'osservazione del manto nevoso è effettuata dai satelliti riprendendo immagini nei seguenti campi della radiazione elettromagnetica:

banda del visibile ($0,5-0,7 \mu$);

finestre atmosferiche del medio infrarosso ($3,5-4,1 \mu$ oppure $10,5-12,5 \mu$);

microonde (intorno a $1,5 \text{ cm}$).

1. *Principi fisici del telerilevamento del manto nevoso.* — La neve appare, nelle immagini riprese dallo spazio, con caratteristiche diverse a seconda della diversa banda elettromagnetica della radiazione rivelata.

Nel campo della radiazione visibile gli oggetti appaiono diffe-

renziati a seconda della loro « riflettività » alla luce solare. Nei casi normali, dati i limiti di risoluzione delle immagini (alcuni chilometri), ed effettuando la normalizzazione dei valori misurati per tener conto dell'inclinazione del sole, si può ritenere che il parametro rilevato dalle immagini sia coincidente con l'« albedo » delle superficie osservate.

La neve, specialmente quella fresca e compatta, ha un'albedo che rasenta il 100 %, e raramente è inferiore all'80 %; pertanto, nelle immagini riprese nel visibile, essa è sempre nettamente distinguibile da ogni tipo di suolo, da quello boscoso (albedo intorno a 5-10 %) a quello roccioso o argilloso (albedo fino al 20-30 %).

Le nubi, invece, oltre all'effetto di schermo che impedisce la visione della superficie terrestre attraverso di esse, possono essere scambiate con la neve, poiché hanno albedo normalmente alte, variabili dal 30% nel caso dei cirri ad oltre l'80% nel caso dei cumulonemi. A parte casi sporadici (come l'osservazione della superficie terrestre attraverso cirri particolarmente trasparenti), l'unica differenza sostanziale tra l'aspetto della neve e quello delle nubi nelle immagini riprese nella banda del visibile è la « persistenza ». Su questo principio è basata la pratica operativa che sarà descritta in seguito, consistente nel confronto fra immagini della stessa zona ritratta più volte a certi intervalli di tempo.

Nella finestra atmosferica infrarossa la radiazione termica emessa dai corpi condensati passa attraverso l'atmosfera praticamente senza essere assorbita. Pertanto il satellite può misurare la « temperatura equivalente di corpo nero » della scena osservata. Poiché, alle temperature comuni sulla superficie terrestre e nel campo del medio infrarosso, quasi tutti i corpi condensati emettono come corpi neri (o, quanto meno, grigi), le misure radiometriche in finestra atmosferica forniscono praticamente la « temperatura termodinamica » della scena osservata (in realtà alcune correzioni sono necessarie per tener conto della non perfetta trasparenza dell'atmosfera, e della emissività del corpo osservato, generalmente inferiore, sia pure di poco, all'unità).

Nelle immagini riprese in finestra atmosferica infrarossa la neve appare distinta dal suolo: ma, poiché in questo caso il segnale dipende dalla temperatura e non dalla riflettività, il contrasto tra neve e suolo, specialmente nella stagione invernale, in cui an-

che il suolo può essere molto freddo, non è così marcato come nelle immagini riprese nella banda visibile. Tuttavia, le immagini in infrarosso forniscono un'informazione supplementare, la temperatura della superficie del manto, utile per valutare la prossimità alle condizioni di scioglimento della neve. L'utilizzazione simultanea di immagini nel visibile (per valutare l'estensione del manto) e nell'infrarosso (per valutare lo stato del manto) sembra essere particolarmente utile. Anche nel caso della finestra atmosferica le nubi, oltre a mascherare la scena sottostante, hanno un aspetto simile a quello della neve, essendo la loro superficie superiore normalmente a temperatura molto variabile, ma sempre nell'intervallo possibile per la neve (inferiore a 0°).

La radiometria nel campo delle microonde è una tecnica ancora agli albori della sperimentazione, e l'interpretazione delle immagini relative è ancora alquanto controversa, poiché il processo fisico del trasporto radiattivo della radiazione attraverso l'atmosfera nel campo delle microonde dipende contemporaneamente da diversi parametri, come il vapor acqueo contenuto nell'atmosfera, l'acqua liquida (nubi) e, soprattutto (ma in modo pressoché costante), l'ossigeno. Il parametro rilevato nelle immagini riprese nel campo delle microonde è la « temperatura di brillantezza » della scena, una grandezza legata in vario modo alla temperatura termodinamica ed alle proprietà dielettriche del corpo osservato, nonché (come si è accennato) alle condizioni dell'atmosfera.

In generale, la neve presenta temperature di brillantezza relativamente modeste (corrispondenti ad emissività dell'ordine del 50%), nettamente differenziate dalle temperature di brillantezza del suolo di qualsiasi tipo, che è sempre caratterizzato da emissività maggiore del 90%. Le nubi, nel campo delle microonde, sono pressoché trasparenti (salvo quando costituite da gocce molto grandi), e pertanto il campo delle microonde sembra estremamente promettente per il rilevamento dell'estensione del manto nevoso. Una particolarità molto interessante è anche costituita dal fatto che la neve presenta diversa temperatura di brillantezza a seconda del suo grado di mescolamento con l'acqua liquida. E' sufficiente una percentuale di acqua liquida del 5% in volume per elevare l'emissività della neve fino al 90%. Questa circostanza offre la prospettiva di rivelare le condizioni di scioglimento della neve.

Come si è accennato, l'utilizzazione delle immagini in micro-onde è praticamente subordinata alla disponibilità di altre informazioni (ad es., le immagini nel visibile e nell'infrarosso) per poter discernere fra i vari effetti concomitanti che determinano la temperatura di brillantezza della scena.

2. *Cenni sullo stato di sviluppo dei sensori per immagini.* — Le immagini nel visibile sono il dato più tradizionale fornito dai satelliti meteorologici. I primi satelliti TIROS e, successivamente, ESSA, nonché i primi esemplari di *Nimbus*, riprendevano immagini mediante telecamere, di varia risoluzione e campo di vista. La più classica di queste telecamere, imbarcata operativamente sui satelliti ESSA, era capace di una risoluzione di 3,6 km, con campo di vista di diametro di 3000 km, sufficiente per esplorare, orbita dopo orbita in circa 12 ore, tutta la superficie terrestre. Le immagini venivano trasmesse in tempo reale direttamente dal satellite a chiunque fosse provvisto di una stazione ricevente di limitata complessità (sistema APT: Automatic Picture Transmission); ovvero memorizzate a bordo per essere riversate su comando da terra (AVCS: Advanced Vidicon Camera System).

Successivamente, le telecamere sono state abbandonate per il « metodo radiometrico », che offre i vantaggi di maggiore linearità dinamica e potere risolutivo teoricamente illimitato. Vi è inoltre il vantaggio che lo stesso strumento può riprendere simultaneamente anche immagini nell'infrarosso, che risultano così perfettamente registrate con quelle nel visibile.

Il più classico radiometro per l'infrarosso (HRIR: High Resolution Infrared Radiometer) era stato sistemato sui satelliti *Nimbus*, ed era capace di una risoluzione di 7,2 km. Nei nuovi satelliti operativi della serie ITOS le immagini nel visibile e nell'infrarosso vengono riprese da un unico radiometro bicanale (SR: Scanning Radiometer) capace di una risoluzione di 7,2 km e di modalità di trasmissione in tempo reale simile al sistema APT. Attualmente sui satelliti operativi della serie ITOS (ribattezzati NOAA dopo il lancio) si trova un radiometro bicanale simile al SR (il VHR: Very High Resolution Radiometer), ma capace di risoluzione di 0,9 km, con linearità dinamica adeguata a fornire 64 livelli di grigio per le immagini nel visibile

e 0°,5 di precisione per le immagini in infrarosso. Anche le immagini riprese da questo strumento vengono trasmesse in tempo reale, ma la stazione ricevente è notevolmente più complessa di quella del sistema APT. Infine, per quanto riguarda le immagini in microonde, il primo radiometro (ESMR: Electrically Scanning Microwave Radiometer), capace di risoluzione di 25 km, è attualmente in sperimentazione sul satellite *Nimbus V*.

3. *Cenni sulle tecniche di elaborazione dei dati.* — L'unico procedimento operativo adottato finora per valutare l'estensione del manto nevoso è basato sulle immagini riprese nella banda del visibile.

L'elaborazione ha lo scopo di « filtrare » il disturbo causato dalle nubi mediante confronto di diverse immagini della stessa area, riprese a distanza di un giorno l'una dall'altra. L'elaborazione si articola in tre fasi: la rettificazione delle immagini, il loro confronto e la costruzione della carta del manto nevoso. Esaminiamo appunto queste varie fasi.

Poiché i satelliti polari non si presentano praticamente mai esattamente negli stessi punti in cui si sono presentati nei giorni precedenti, per poter confrontare le immagini della stessa area riprese in giorni consecutivi è necessario rettificare le immagini. Ciò viene eseguito mediante calcolatore elettronico, che trasporta i valori di brillantezza osservati nei punti di un reticolato geografico fisso (matrice) di risoluzione pari a quella dell'immagine (ad es. 3,6 km), in proiezione (normalmente) stereografica polare.

L'immagine del primo giorno, rettificata, costituisce la matrice iniziale. L'immagine successiva, dopo essere stata rettificata, viene confrontata punto per punto con la matrice iniziale. Nei punti in cui la nuova immagine ha valori di brillantezza minori di quelli della matrice, questa viene aggiornata con i nuovi valori. Così, man mano che nuove immagini sono disponibili, i valori della matrice vengono sostituiti ogni volta che vi è un nuovo valore minore del precedente.

Dopo un certo numero di giorni (normalmente cinque) viene estratta la matrice finale, che riporta tutti i minimi valori di brillantezza verificatisi nell'intervallo di tempo prefissato. Poiché è plau-

sibile che in cinque giorni ciascun punto sia stato almeno una volta sgombro da nubi, i punti che ancora risultassero brillanti dovrebbero essere coperti di neve. Si noti che la carta del manto nevoso può essere estratta quotidianamente, sulla base delle immagini riprese nei cinque giorni precedenti.

4. *Conclusione.* — Finora, a causa della non elevata risoluzione delle immagini disponibili (circa 3,6 km), le elaborazioni descritte sono state effettuate operativamente soltanto a grande scala, per produrre carte emisferiche dell'estensione dei ghiacci polari. Esperimenti a più piccola scala (alcuni pure sulle Alpi) hanno avuto carattere dimostrativo. La risoluzione degli attuali strumenti, in particolare del VHR (0,9 km), promette ora notevoli prospettive operative anche a piccola scala. Oltremodo promettente è pure la possibilità di utilizzare simultaneamente le immagini nel visibile e quelle nell'infrarosso per dedurre contemporaneamente estensione e temperatura superficiale del manto nevoso. Si ricorda ancora che tali immagini sono ottenibili in tempo reale da qualunque utente locale (tuttavia gli apparati per la ricezione e per la elaborazione dei dati risultano abbastanza costosi).

Infine, per quanto riguarda il campo delle microonde, è da dire che gli attuali limiti di risoluzione (25 km) rendono imperisabili applicazioni a piccola scala. Un notevole miglioramento tecnologico è ancora necessario. Sono inoltre da chiarire ancora le tecniche di elaborazione ed interpretazione di tali dati che, peraltro, da un punto di vista puramente teorico, appaiono i più promettenti per il telerilevamento operativo dello stato della superficie terrestre.

BIBLIOGRAFIA

- BARNES J. C. e BOWLEY C. J., *Operational Guide for Mapping Snow Cover from Satellite Photography*, Contract N° E-162-67 (N), Allied Research Assoc., Concord, Mass., 1968.
- BARNES J. C. e BOWLEY C. J., *Snow Cover Distribution as Mapped from Satellite Photography*, in « Water Resources Research », Washington, 1968, pp. 257-272.

- BARRETT E. C., *Viewing Weather from Space*, Londra, Longmans-Green, 1967.
- FRITZ S., *Snow-Surveys from Satellite Meteorology*, in « Proc. of First Intern. Symposium on Rocket and Satellite Meteorol. », Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1962, pp. 419-421.
- FRITZ S., *Satellite Pictures of the Snow-covered Alps during April 1960*, in « Archiv für Meteorol. und Bioklimatol. », Vienna, serie A, vol. 13, 1962, n. 2, pp. 186-197.
- McCLAIN E. P. e BAKER D. R., *Experimental Large-Scale Snow and Ice Mapping with Composite Minimum Brightness Charts*, Technical Memorandum NESCTM 12, National Environmental Satellite Center, Washington, U.S. Dep. of Commerce, 1969.
- POPHAM R. W., *Satellite Applications to Snow Hydrology*, Ginevra, World Meteorol. Organiz., Intern. Hydrol. Decade, Report N° 7, 1968.
- POPHAM R. W., FLANDERS A. F. e NEISS H., *Second Progress Report on Satellite Application to Snow Hydrology*, in « Proc. of the Twenty-Third Eastern Snow Conference », Hartford, Conn., 1966.
- WARK D. Q. e POPHAM R. W., *The Development of Satellite Ice Surveillance Techniques*, in « Proc. of First Intern. Symposium on Rocket and Satellite Meteorol. », Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1962, pp. 415-418.