



*Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*  
*Dipartimento di Scienze e Tecnologie*

*Corso di Telerilevamento*

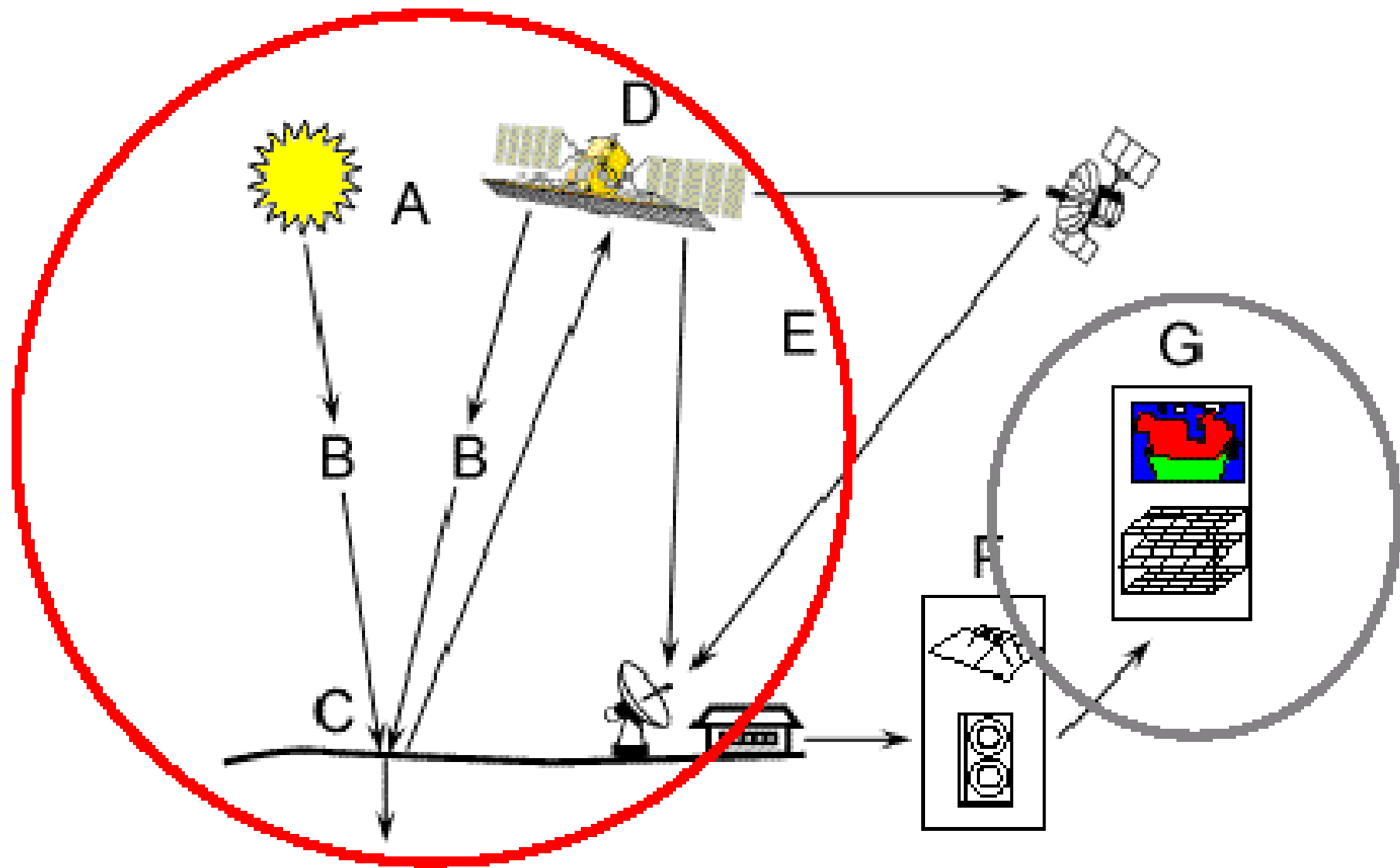
*Lezione 2*

# **Diffusione atmosferica**

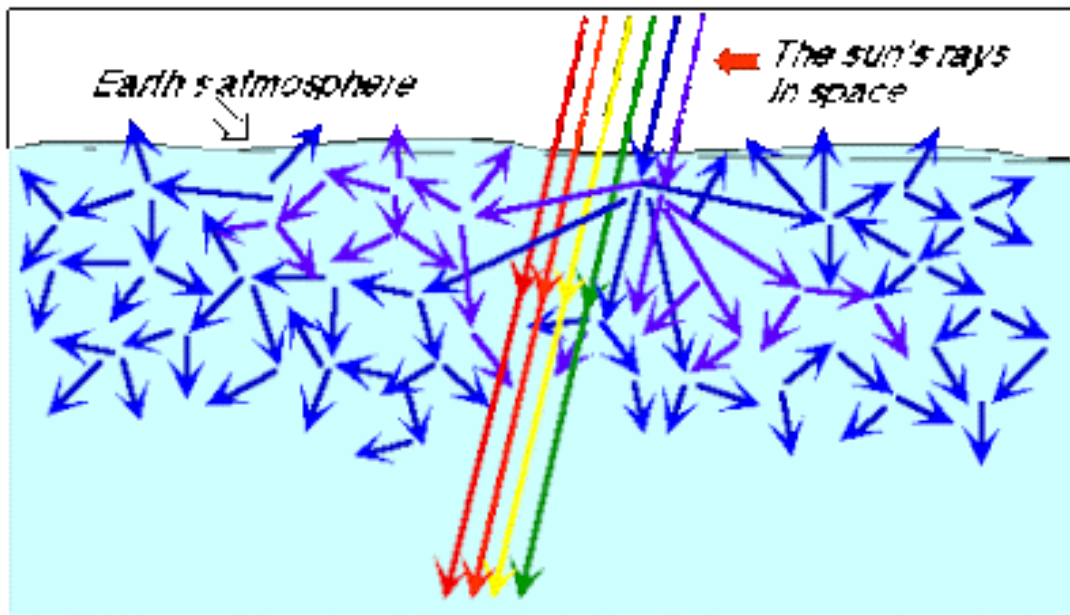
## **Finestre atmosferiche e firme spettrali**

*Claudio Parente*

# PROCESSO DEL TELERILEVAMENTO



# Diffusione atmosferica



# La diffusione atmosferica

Il fenomeno della diffusione atmosferica (o ***scattering***) si verifica quando la radiazione, venendo a contatto con le molecole di gas e con le piccolissime particelle costituenti l'atmosfera, è “dispersa” in varie direzioni.

□ Effetto foschia e perdita di nitidezza delle immagini.

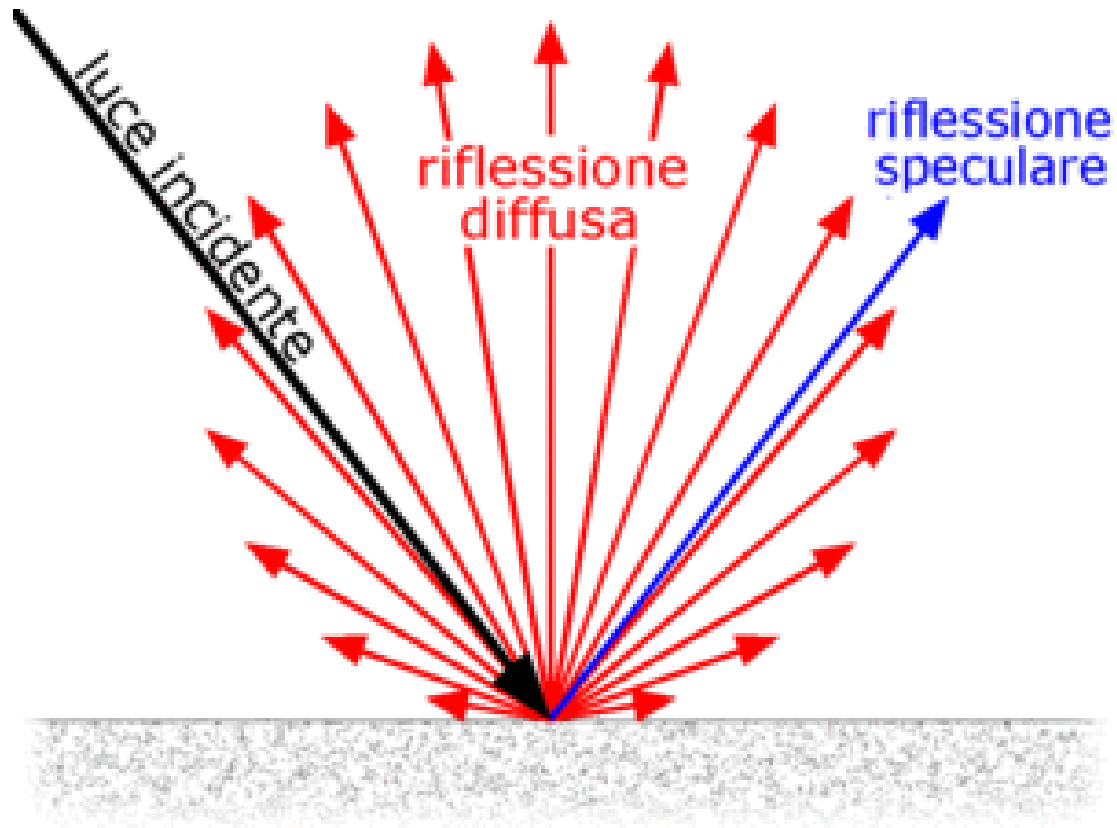
Questi effetti sono particolarmente accentuati nel visibile e nell'infrarosso e praticamente nulli nelle microonde.

# La diffusione atmosferica

Si distinguono tre forme di diffusione:

- diffusione di **Rayleigh**;
- diffusione di **Mie**;
- diffusione **non selettiva**.

# La diffusione atmosferica



# La diffusione di Rayleigh

È il meccanismo dominante di dispersione nell'atmosfera e si verifica quando le particelle sono molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione. Questo è un fenomeno selettivo e la quantità di scattering è data da:

$$E_R(\theta) = \frac{K(1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4}$$

Dove  $K$  dipende dall'indice di rifrazione del mezzo e  $\theta$  è l'angolo tra l'onda incidente e la direzione del generico raggio diffuso.

# La diffusione di Rayleigh

Per una data lunghezza d'onda, la diffusione non è la medesima in tutte le direzioni ma varia tra un minimo di  $K/\lambda^4$  (per  $\theta = \pm 90^\circ$ , cioè in direzione normale alla radiazione incidente) ed un massimo di  $2 K/\lambda^4$  (per  $\theta = 0^\circ$ , cioè per il raggio retrodiffuso nella stessa direzione di provenienza).

Inoltre tale tipo di diffusione varia con l'inverso della quarta potenza di  $\lambda$ .



# La diffusione di Rayleigh

La diffusione di Rayleigh è, inoltre, responsabile del colore blu del cielo poiché le lunghezze d'onda più corte dello spettro visibile (cioè l'azzurro ( $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ )) sono diffuse maggiormente rispetto alle altre lunghezze d'onda più lunghe.

# La diffusione di Mie

Si verifica quando la lunghezza d'onda della radiazione è comparabile con la grandezza delle particelle, come ad esempio il caso di piccole particelle di polvere, di prodotti di combustione e di Sali marini nell'atmosfera.

Differisce dalla precedente perché l'energia è fortemente retrodiffusa in direzioni prossime a quella della radiazione incidente e decade sensibilmente nelle altre direzioni (plume).

Dipende molto poco dalla lunghezza d'onda (variabile da un minimo di  $\lambda^{-2}$  ad un massimo di  $\lambda^{0.6}$ , a seconda dell'atmosfera).

# La diffusione non selettiva

Si ha quando il diametro delle particelle sospese nell'atmosfera, in particolare polveri e goccioline d'acqua, che hanno solitamente un diametro tra 5 e 100 micron, è molto più grande della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica.

Mostra una trascurabile dipendenza dalla lunghezza d'onda per cui le radiazioni sono diffuse tutte pressoché allo stesso modo, dal visibile all'infrarosso riflesso. Per questo motivo la nebbia e le nuvole, diffondendo in quantità uguale dal blu al rosso, appaiono bianche.

# Assorbimento da parte dell'atmosfera

L'energia assorbita da alcuni componenti dell'atmosfera è solitamente trattenuta come energia interna soltanto in minima parte, riscaldando l'atmosfera stessa, mentre la gran parte è poi riemessa.

I gas componenti l'atmosfera che maggiormente interagiscono con le onde elettromagnetiche producendo il fenomeno dell'assorbimento sono: il vapore acqueo (H<sub>2</sub>O), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), l'ossigeno (O<sub>2</sub>) e l'ozono (O<sub>3</sub>).

# Assorbimento da parte dell'atmosfera

Questi componenti, ma soprattutto l'acqua producono assorbimento in buona parte dello spettro elettromagnetico.

Esistono, però, delle regioni dello spettro in cui la radiazione è trasmessa, essendo minime o nulle le perdite dovute all'assorbimento.

Tali ragioni, sono delle finestre di trasparenza e si chiamano ***finestre atmosferiche***.

# Principali finestre atmosferiche

0.4 – 0.7  $\mu\text{m}$ , cioè nell'intero campo del visibile;

0.7 – 0.13  $\mu\text{m}$ , 1.5 -1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 – 2.6  $\mu\text{m}$ , nell'infrarosso riflesso;

3 – 5  $\mu\text{m}$ , nell'infrarosso termico vicino;

8 – 14  $\mu\text{m}$ , nell'infrarosso termico medio;

1mm – 1 m, cioè nell'intera regione delle microonde.

# Principali finestre atmosferiche

Dalla comparazione delle caratteristiche delle due principali fonti di energia (il Sole e la Terra) con le finestre atmosferiche, possiamo definire le lunghezze d'onda effettivamente utilizzate nel telerilevamento:

la regione del visibile,

dell'IR termico,

delle microonde.

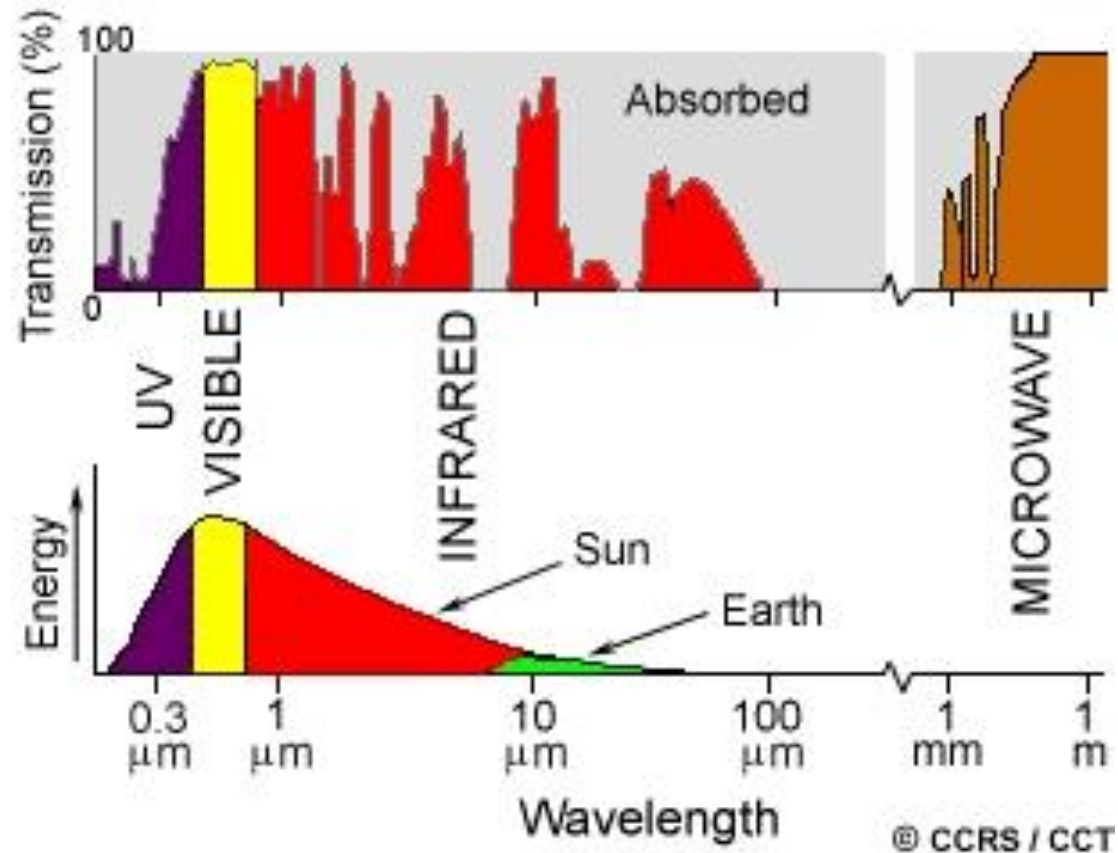
# Principali finestre atmosferiche

La conoscenza delle finestre di trasparenza dell'atmosfera è fondamentale anche per la definizione delle caratteristiche dei sensori:

i sensori del telerilevamento sono solitamente costruiti per operare proprio in una o più di tali finestre ed effettuano le misure utilizzando rivelatori sensibili a certe lunghezze d'onda che sicuramente attraversano l'atmosfera.



# Principali finestre atmosferiche



*Le finestre atmosferiche (Fonte: Canada Centre of Remote Sensing)*

# Firma spettrale

I sensori per lo studio delle risorse terrestri non effettuano 'fotografie' della superficie, ma misurano l'energia riflessa e/o emessa dai vari corpi presenti al suolo.

# Firma spettrale

Osservando l'energia riflessa nelle varie lunghezze d'onda si può ricavare una tipica curva di riflettività che permette di distinguere una superficie dalle altre o corpi che hanno stati fisici diversi.

La firma spettrale interessa tutte le regioni dello spettro anche quelle poste oltre il visibile, come l'infrarosso.

# La firma spettrale di una superficie

E' così definita la funzione

$$\rho(\lambda)$$

che descrive la riflettività di un

determinato tipo di materiale

in funzione della lunghezza d'onda

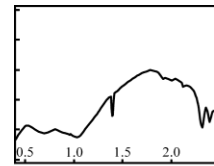
della radiazione incidente.

La firma spettrale di un corpo

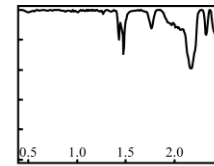
può essere determinata mediante

analisi di laboratorio (spettrometri).

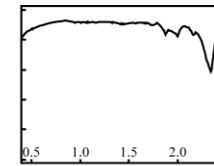
A fianco, esempi di firma spettrale  
per alcuni minerali.



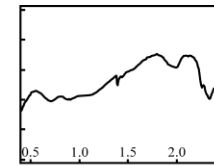
ACTINOLITE  
AM3000



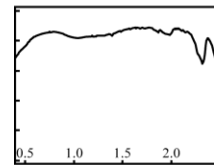
ALUNITE  
AL705



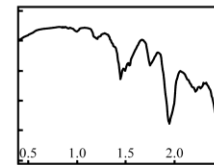
CALCITE  
CO2004



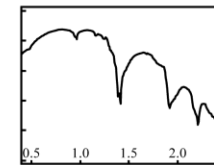
CHLORITE  
CH2402



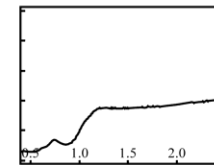
DOLOMITE  
COD2005



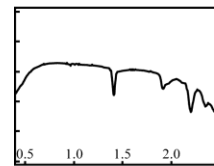
GYPSUM  
SU2202



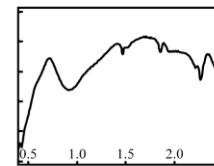
HALLOYSITE  
KLH503



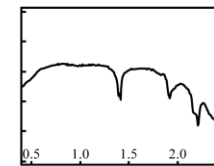
HEMATITE  
FE2602



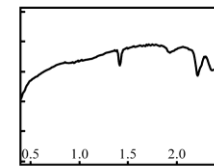
ILLITE  
IL101



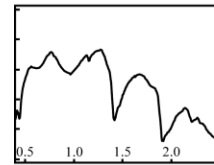
JAROSITE  
JR2501



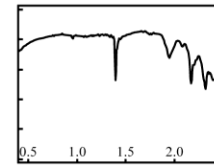
KAOLINITE  
KL502



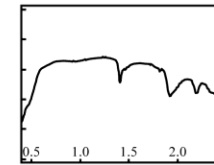
MUSCOVITE  
IL107



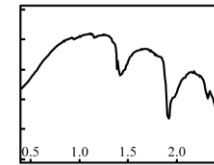
NOTRONITE  
SMN454



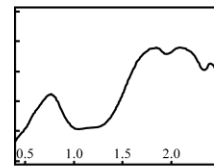
PYROPHYLLITE  
PY602



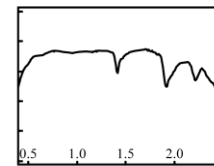
RECTORITE  
ISR202



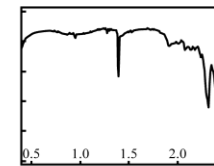
SEPIOLITE  
SEP3101



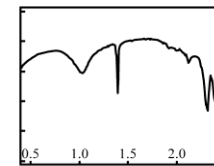
SIDERITE  
COS2002



SMECTITE  
SMM402



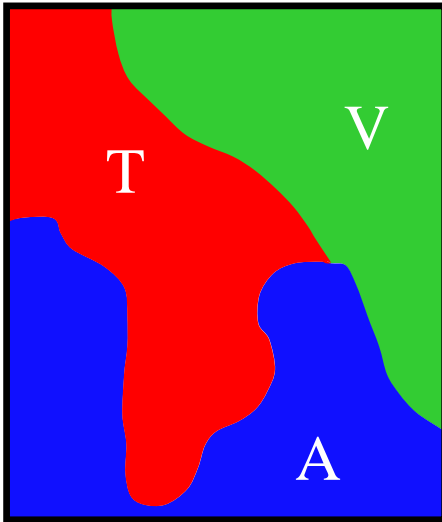
TALC  
TL2702



TREMOLITE  
AMT3001

# Telerilevamento: il caso ideale

- Un insieme di sensori registra la radianza riflessa da un pixel della superficie del pianeta, per tutte le lunghezze d'onda.
- Si ottiene quindi, per quel pixel, una firma spettrale osservata.
- Si confronta la firma spettrale osservata con un archivio di firme spettrali note.
- Si attribuisce il pixel alla classe di superficie corrispondente alla firma spettrale osservata.

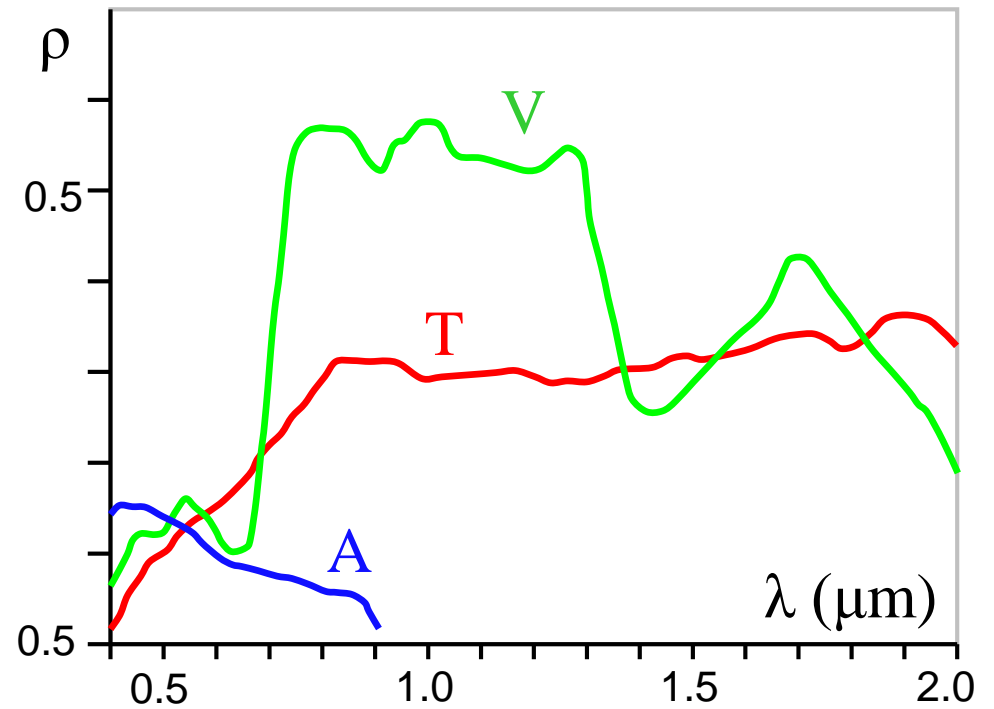
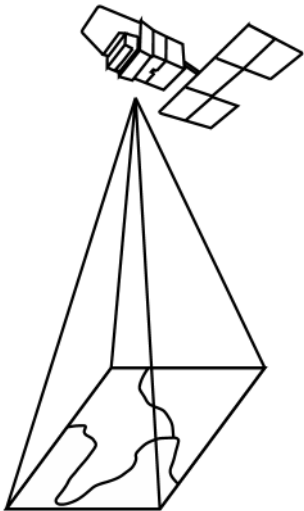


Tre tipi di copertura del suolo:

A = Acqua,

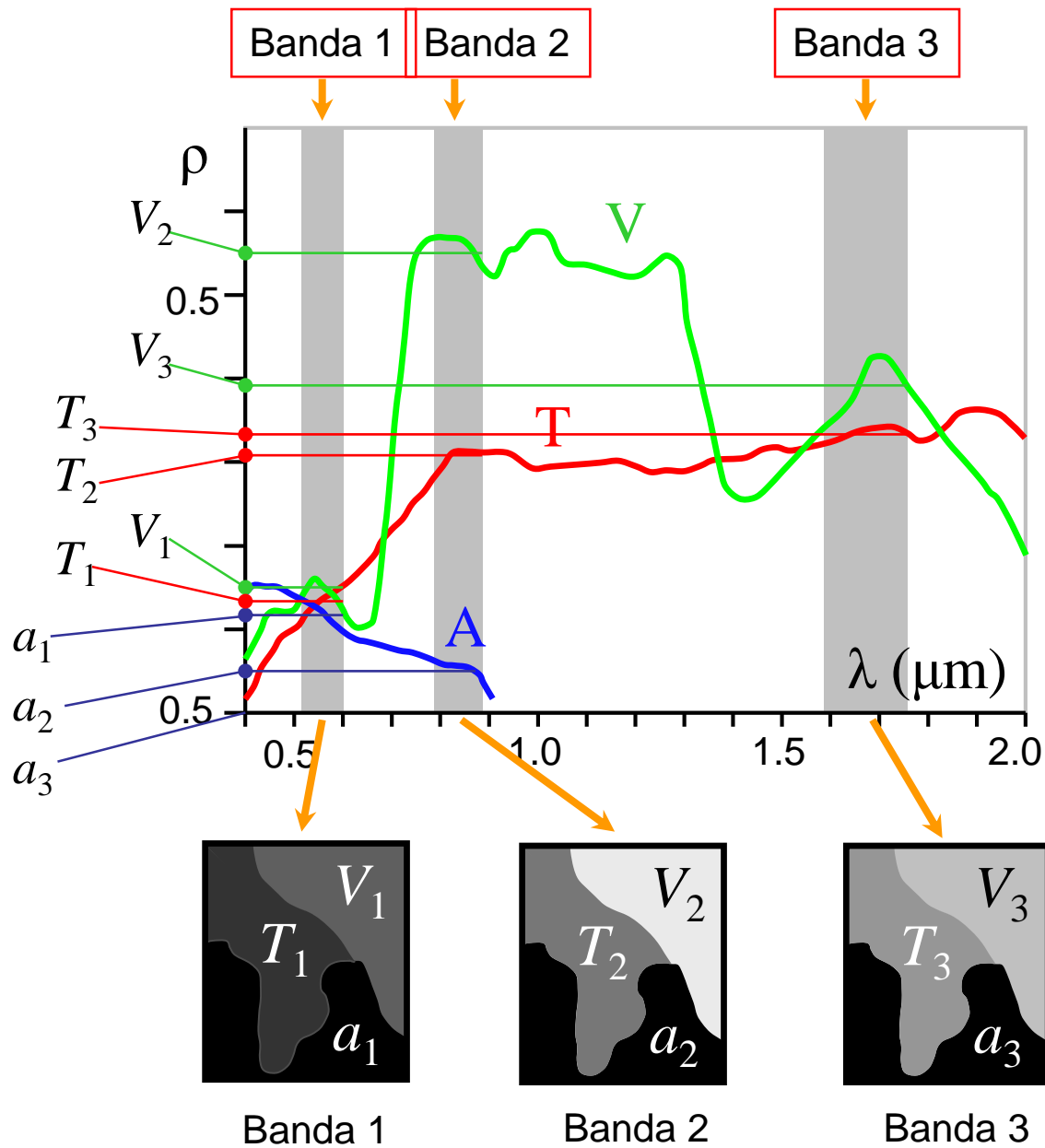
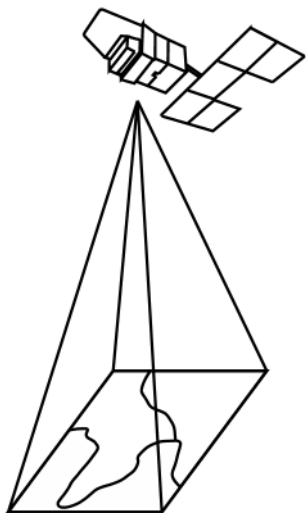
T = Terra spoglia,

V = Vegetazione



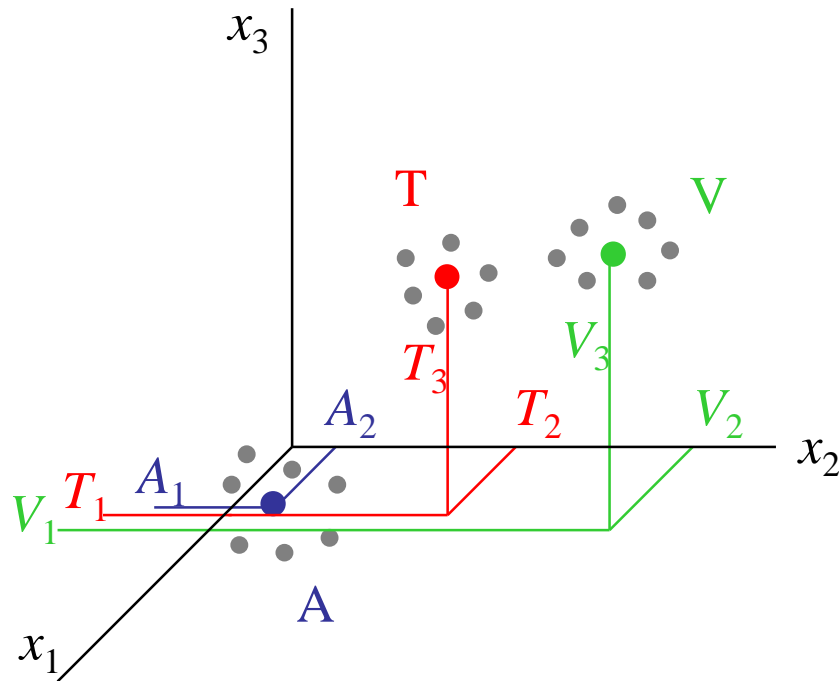
# L'utilizzo della firma spettrale

## B. Acquisizione dei dati



# L'utilizzo della firma spettrale

## C. Analisi dei dati



Le tre bande generano  
uno spazio tridimensionale

**Lo spazio multispettrale**

I valori di un pixel nelle tre bande  
costituiscono le sue coordinate nello spazio

Pixel corrispondenti  
allo stesso tipo di copertura (**classe**) hanno  
valori simili nello spazio multispettrale

Pixel in classi diverse  
hanno valori differenti



# Firma spettrale

La firma spettrale di una superficie non può essere determinata in termini assoluti.

Innanzitutto una tipologia (classe) di copertura del terreno (ad esempio: foresta) non può essere univocamente definita: include tipologie simili ma differenti di materiali (nel caso della foresta i diversi alberi), caratterizzati da firma spettrale simile ma non identica.

# Firma spettrale

Inoltre, anche riuscendo a definire classi costituite da un singolo tipo di materiale (la classe pini), .....

permangono variazioni interne di firma spettrale dovute sia alla coesistenza di diversi stadi e stati del medesimo materiale (pini giovani anziché vecchi o presenza di malattie), sia alle variazioni delle condizioni del suolo (per esempio: umidità).

# Firma spettrale

In ogni caso una classificazione assoluta, ovvero basata fra le funzioni di riflettività osservate e una libreria nota a priori di firme spettrali potrebbe essere un obiettivo realizzabile solo su un pianeta senza atmosfera.

Nel caso della Terra si debbono considerare gli effetti atmosferici sulla propagazione del segnale elettromagnetico: questi, differenti e mutevoli da luogo a luogo e da epoca a epoca, mascherano le osservazioni di riflettività.

# Firma spettrale

Di conseguenza la funzione di riflettività non può essere ricavata dalle osservazioni del sensore neppure per mezzo di ipotetiche correzioni ideali (correzioni radiometriche).

Per tali motivi la classificazione assoluta, se non impossibile, risulta estremamente difficile.

Viene in genere adottata una strategia di classificazione relativa: i pixel caratterizzati da valori osservati aventi valore di riflettanza simile per le diverse bande dei sensori, vengono classificati nella stessa classe.

# Firma spettrale dell'acqua

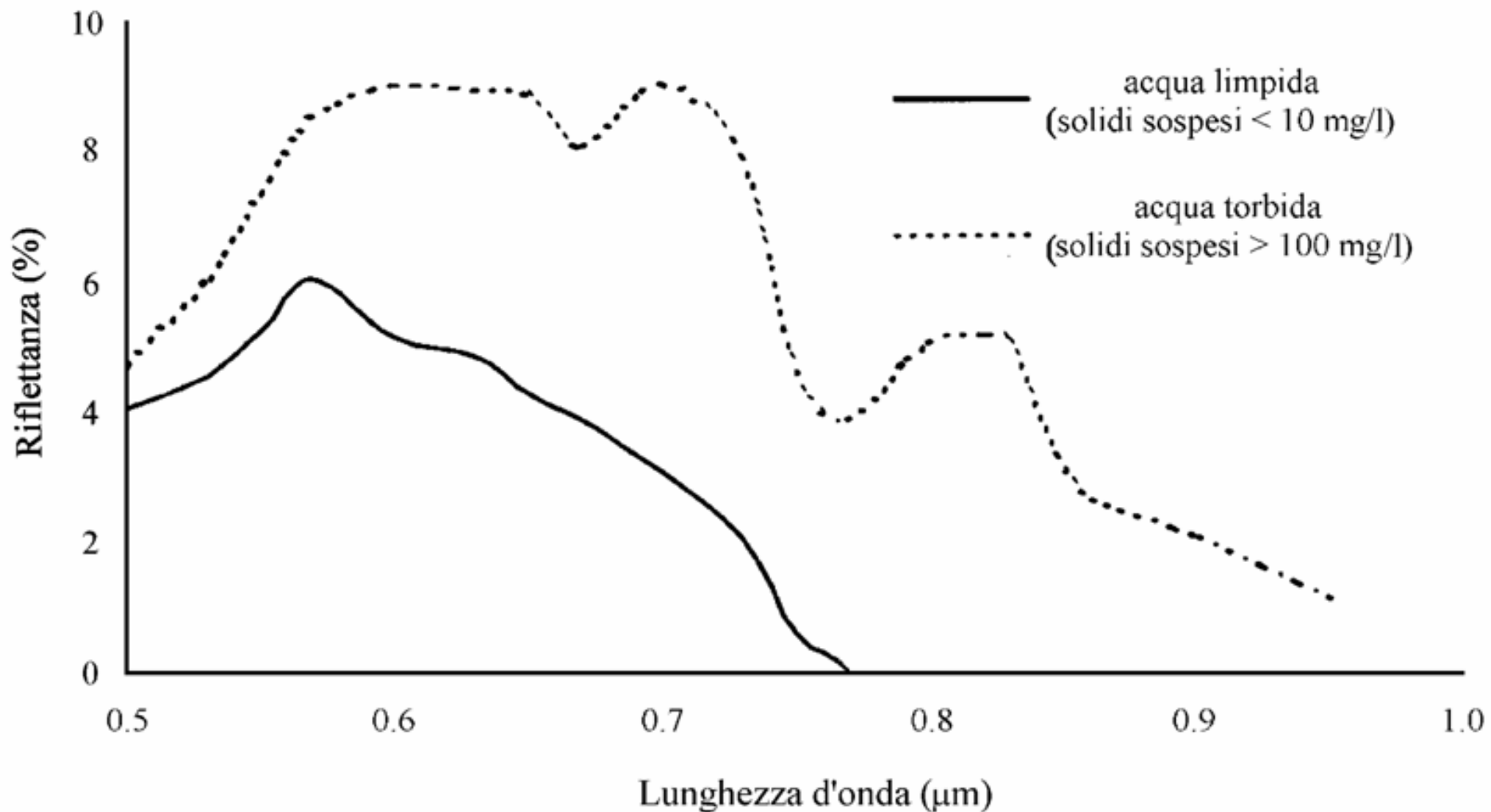
La risposta spettrale dell'acqua varia con la lunghezza d'onda: l'acqua limpida assorbe maggiormente le radiazioni più lunghe del visibile e dell'infrarosso, mentre diffonde le lunghezze d'onda più corte; per questo motivo l'acqua ci appare blu o blu - verde, avendo il valore massimo di trasmissività a  $0.45 \mu\text{m}$ , nel blu.

Usualmente l'acqua in condizioni di purezza, riflette fino ad un massimo che può raggiungere il 5% dell'energia incidente, valore che, rispetto alle normali superfici opache, risulta estremamente piccolo.

# Firma spettrale dell'acqua

Se invece si potesse osservare uno specchio d'acqua colpito solo da radiazione incidente rossa o infrarossa, esso apparirebbe scuro, in quanto tali lunghezze d'onda vengono totalmente assorbite.

I corpi idrici hanno perciò un particolare comportamento spettrale che generalmente contrasta fortemente con gli altri elementi del paesaggio al contorno e che ne consente una facile interpretazione nelle immagini.



*Firma spettrale di acqua limpida e con solidi sospesi  
nell'intervallo visibile / infrarosso vicino*

# Firma spettrale dell'acqua

La riflettanza della neve è molto alta nella porzione visibile dello spettro, mentre diminuisce rapidamente a lunghezze d'onda maggiori di circa  $1,2 \mu\text{m}$ .

La neve non è facilmente identificabile nelle immagini satellitari nel campo della radiazione visibile e del vicino infrarosso in quanto la sua risposta spettrale si confonde con quella delle nuvole.

Inoltre è possibile in molti casi che nuvole e neve saturino i sensori satellitari data l'alta riflessività in queste lunghezze d'onda ( $> 80\%$ ).



# Firma spettrale dell'acqua

La neve cambia il suo comportamento a lunghezze d'onda maggiori presentando una riflettività molto bassa nell'infrarosso medio (1,3 – 3,0  $\mu\text{m}$ ).

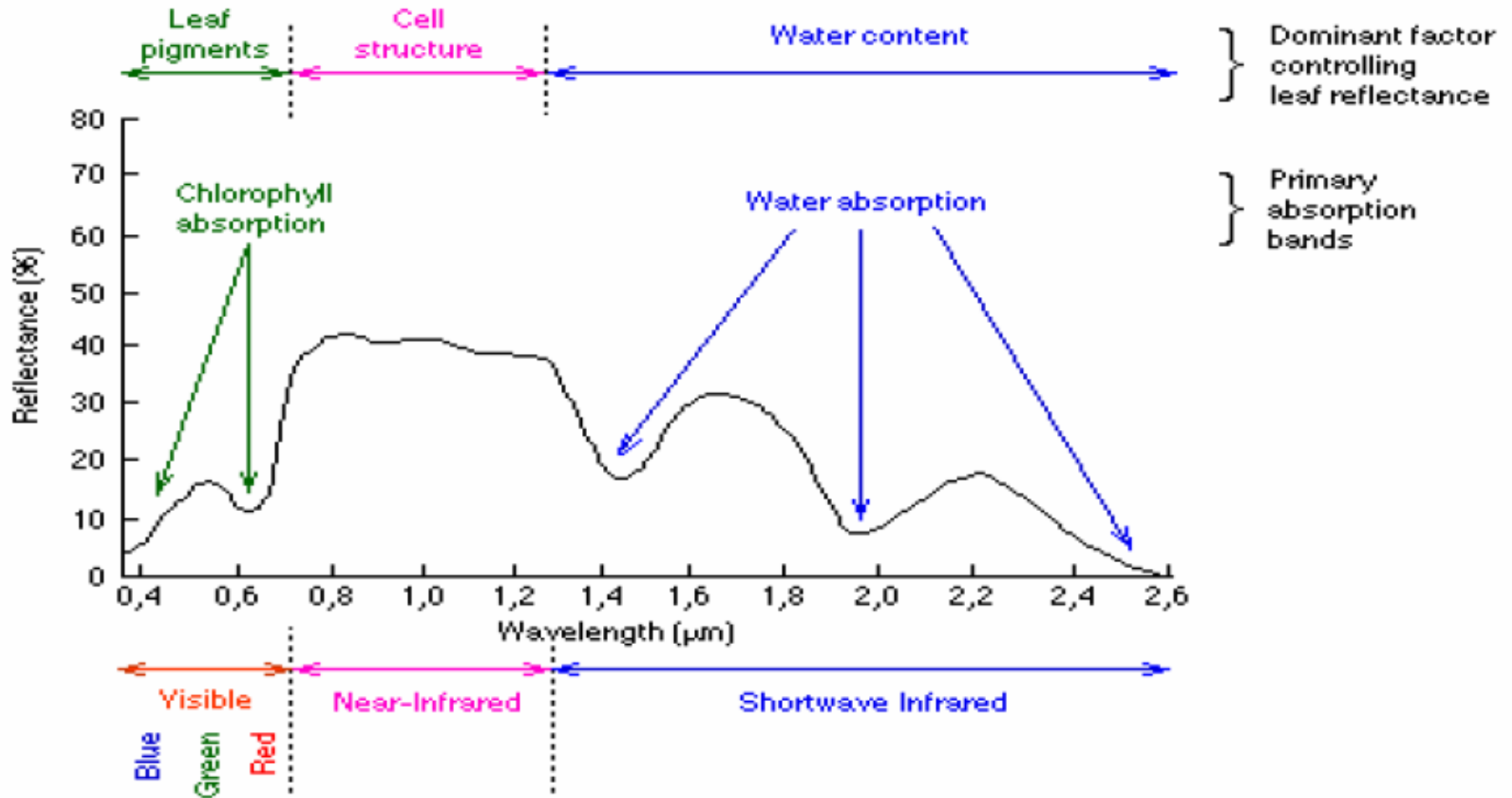
In queste lunghezze d'onda si può quindi più facilmente distinguere superfici innevate dalle nuvole che mantengono invece un valore molto elevato di riflessione.

# Firma spettrale della vegetazione

La vegetazione manifesta comportamenti spettrali specifici a diverse lunghezze d'onda producendo una firma caratteristica.

La curva di riflettanza può variare il suo andamento in funzione di molti fattori quali il tipo di vegetazione e la sua densità, il contenuto di umidità, ecc.

# Firma spettrale della vegetazione



# Firma spettrale della vegetazione

In particolare il suo andamento è regolato nelle bande del visibile, vicino e medio infrarosso rispettivamente dal contenuto e tipo di pigmenti fogliari, dalla struttura fogliare ed il contenuto in acqua.

*Pigmenti fogliari:* la porzione di energia riflessa nel campo del visibile è correlata alla presenza di pigmenti fogliari quali la clorofilla, la xantofilla e il carotene. La clorofilla determina l'assorbimento nel blu e nel rosso e una riflessione dell'energia incidente dell'8 - 15 % nel verde. L'epidermide ed i pigmenti fogliari sono molto trasparenti all'infrarosso.

# Firma spettrale della vegetazione

*Struttura fogliare:* è responsabile del comportamento spettrale nelle bande dell'infrarosso vicino, tra 0,70 e 1,35  $\mu\text{m}$  provocando una riflessione molto elevata, nell'ordine del 30 - 70 % dell'energia incidente.

L'energia residua viene soprattutto trasmessa mentre quella assorbita è molto ridotta.

# Firma spettrale della vegetazione

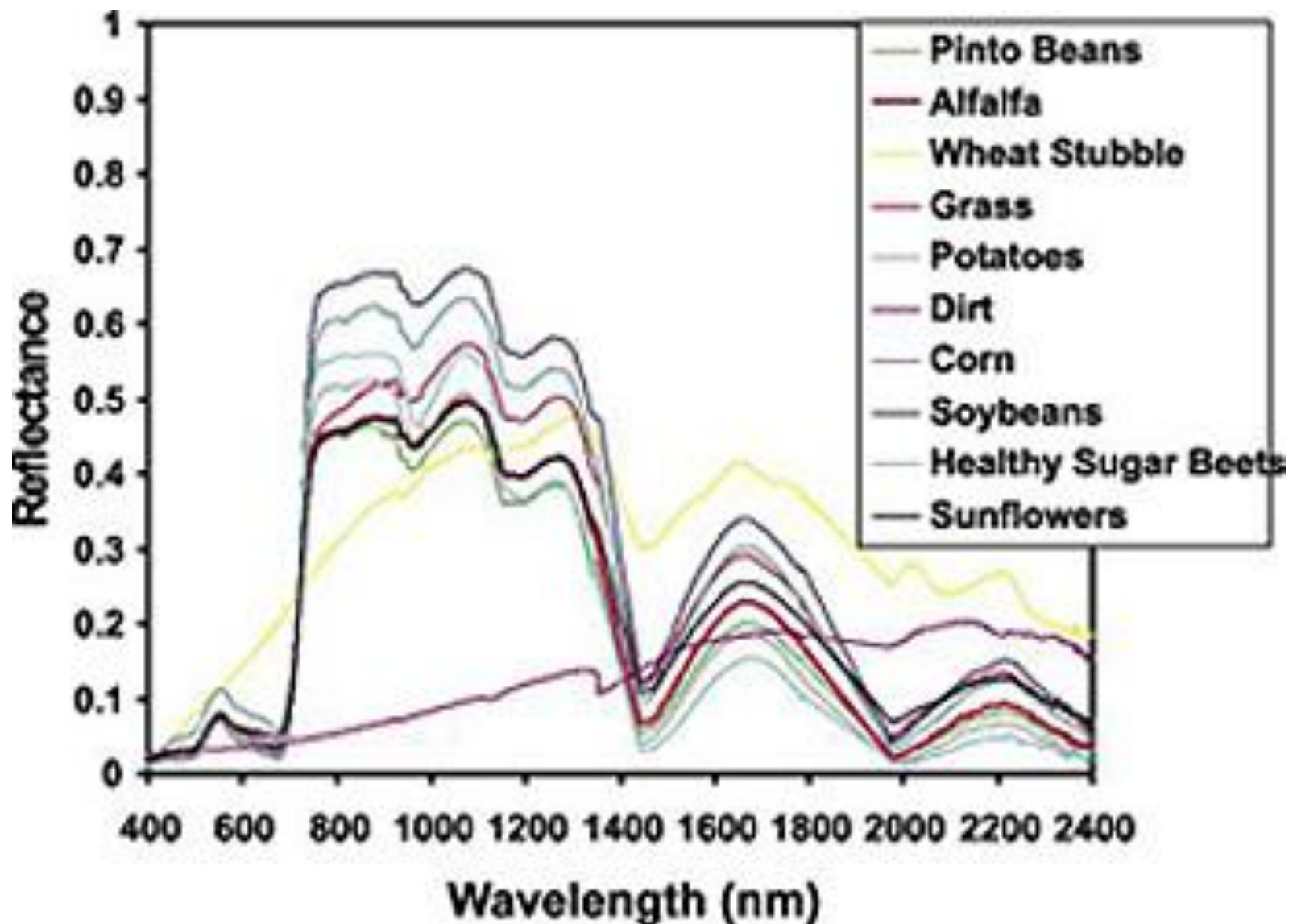
Poiché il mesofilo è più o meno sviluppato a seconda dello stato di salute della pianta, della varietà specifica e dello stadio fenologico, .....

lo studio della riflettanza nell'infrarosso vicino consente di discriminare specie diverse, per analizzare gli stadi evolutivi e per determinare eventuali patologie all'interno di una omogenea comunità vegetale.

# Firma spettrale della vegetazione

*Contenuto in acqua:* nel dominio dell'infrarosso medio, tra 1,35 e 2,70  $\mu\text{m}$ , le proprietà spettrali della vegetazione dipendono strettamente dal contenuto in acqua della foglia.

In condizioni di stress idrico, si ha un innalzamento dei valori di radiazione riflessa, più accentuato in alcune bande di assorbimento.



In tali curve è evidente che la risposta dei materiali vegetali è ben distinta da quella dei materiali inorganici grazie al brusco aumento della riflettività a circa  $0,7 \mu\text{m}$ .



# Firma spettrale della vegetazione

Nel visibile sia le vegetazioni coltivate (grano, semi di soia) che gli alberi e le piante presentano una bassa percentuale di riflettanza e, comunque, una risposta spettrale molto simile.

Ciò è dovuto alla presenza della clorofilla che nel visibile provoca un forte assorbimento e, quindi, per la legge di Kirchhoff, una bassa riflettanza. Intorno a  $0.50 - 0.55 \mu\text{m}$  (corrispondente al verde) si osserva, comunque, un relativo rialzo della riflettanza, e ciò spiega la colorazione della vegetazione che è, generalmente, verde.

# Firma spettrale della vegetazione

Nel caso di coltivazioni, come il grano o soia, tale picco può risultare più spostato verso il giallo (circa  $0,6 \mu\text{m}$ ). Nella regione  $0,7 - 1,3 \mu\text{m}$  (infrarosso vicino) queste coperture vegetali presentano una forte riflettanza dovuta alla struttura delle cellule fogliari che non hanno grandi capacità di assorbire tali radiazioni.

Nella regione  $1,3 - 2,5 \mu\text{m}$  (infrarosso medio) la curva spettrale di riflettanza si attenua a seconda del contenuto d'acqua nelle foglie, la quale assorbe energia. Il massimo assorbimento da parte dell'acqua avviene intorno ad  $1,45 - 1,96 \mu\text{m}$ .

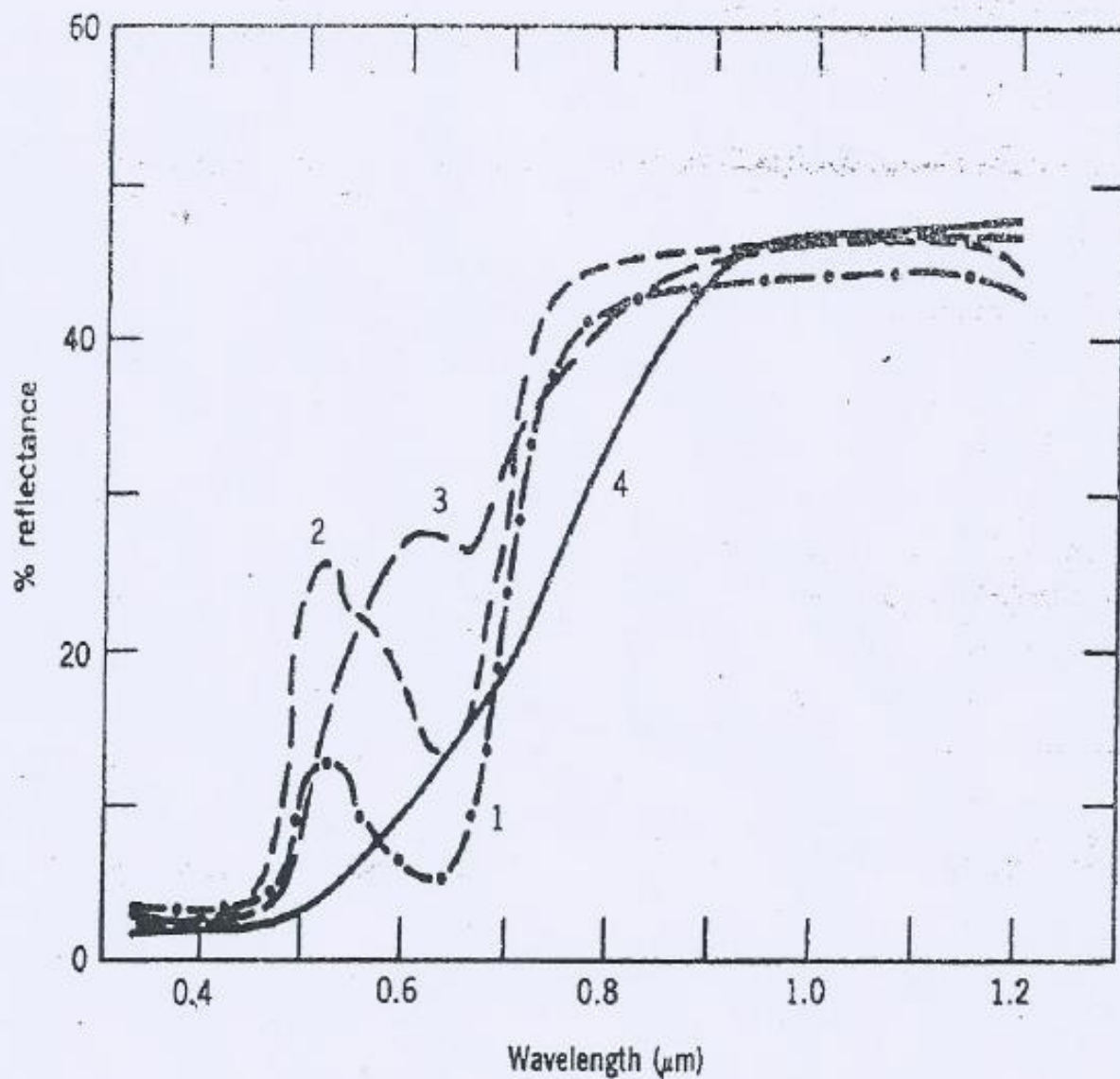
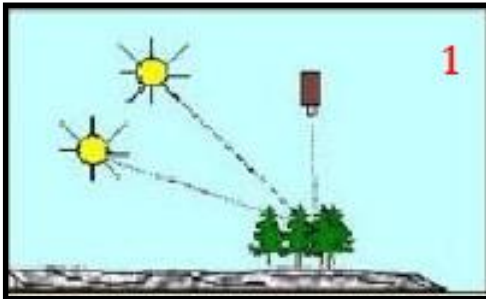
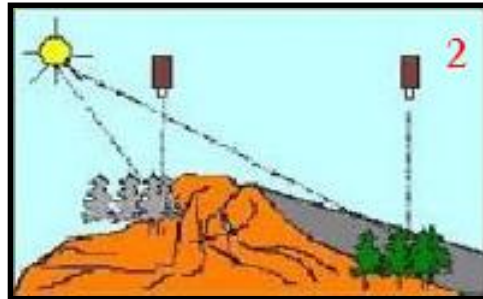


Fig.1-13. Spettri di riflettanza per una foglia di faggio viva (fase 1) e in fasi progressive di senescenza (fasi 2-4). (da Knipling, 1969).

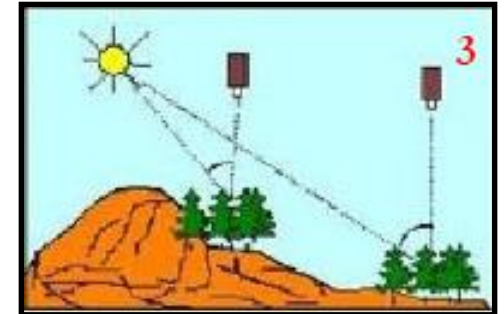
# Fattori che influenzano le firme spettrali



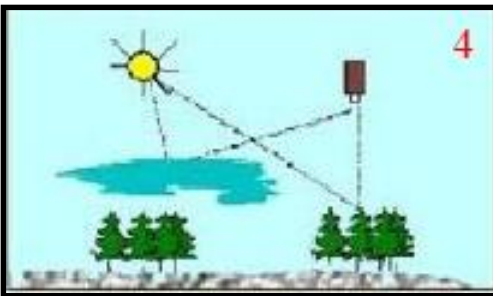
1. Geometria Sole-Sensore



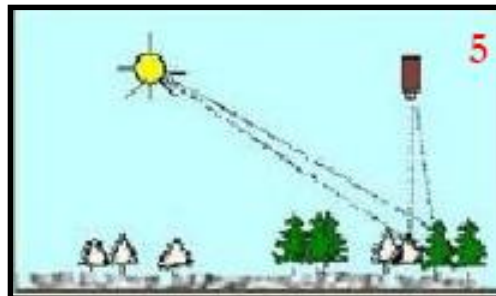
2. Esposizione



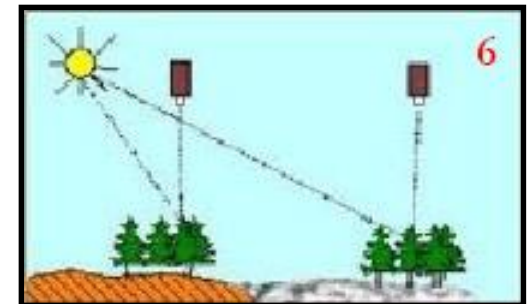
3. Pendenza



4. Atmosfera



5. Caratteristiche oggetto

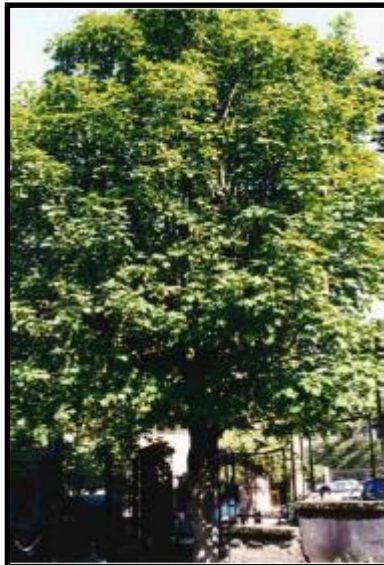


6. Substrato

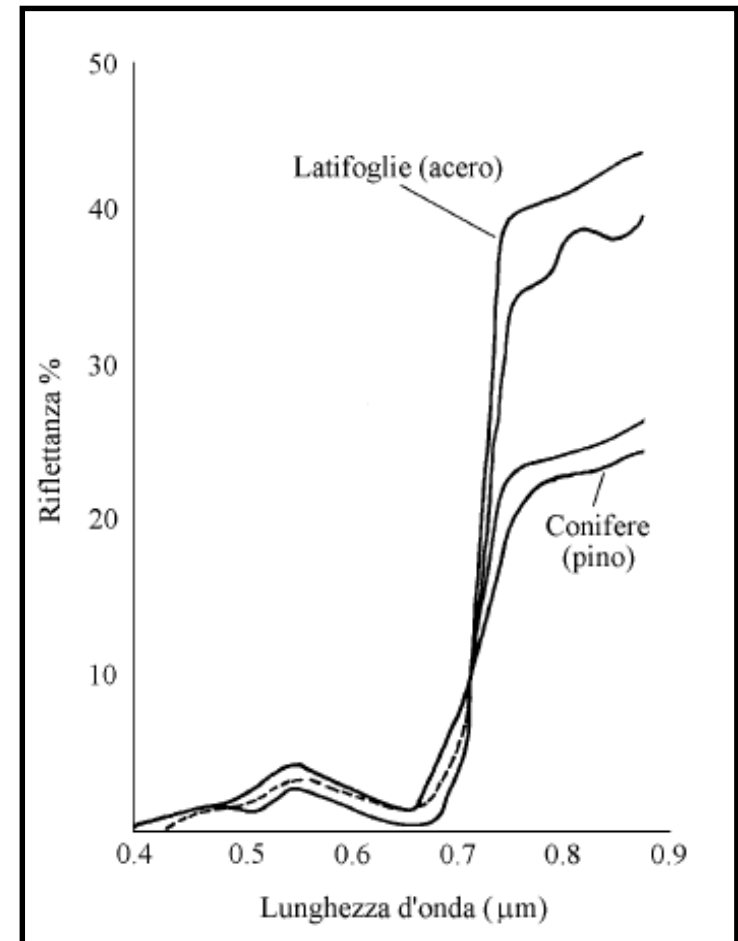
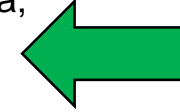
## Firma spettrale della vegetazione

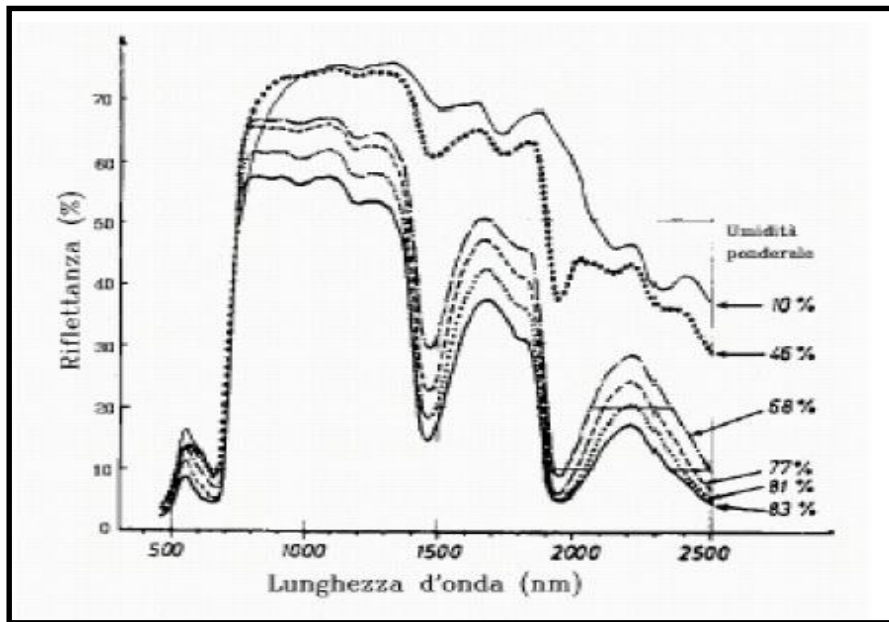
Fattori che ne influenzano la riflettività:

- grado di copertura;
- quantità di biomassa verde;
- presenza e tipologia di sottobosco;
- stato di salute, etc..

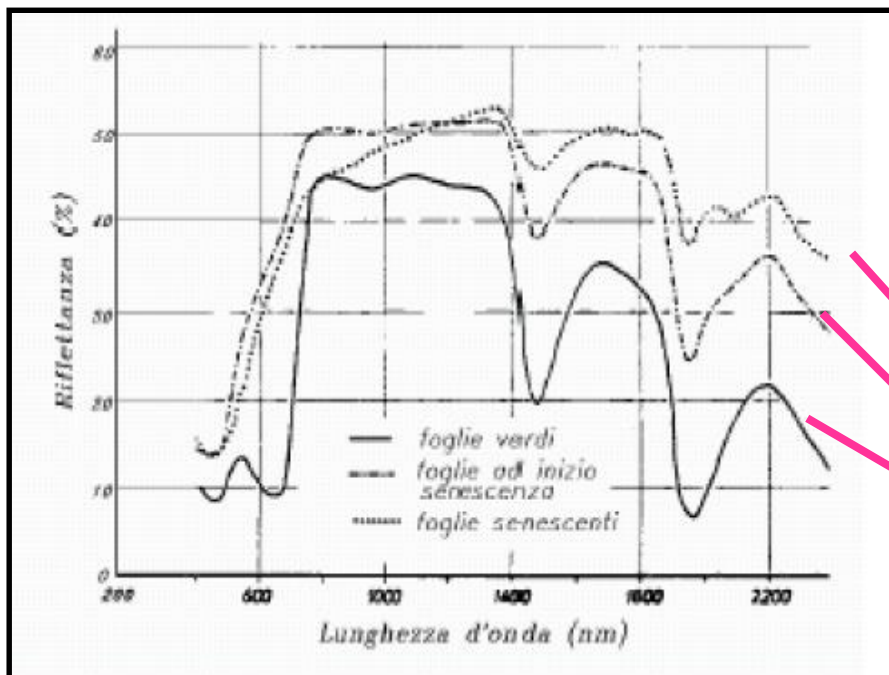


contenuto di clorofilla;  
struttura cellulare;  
contenuto d'acqua;





Variazione della risposta spettrale in funzione del contenuto d'acqua delle foglie.



Variazione della risposta spettrale nella fase di senescenza delle foglie.

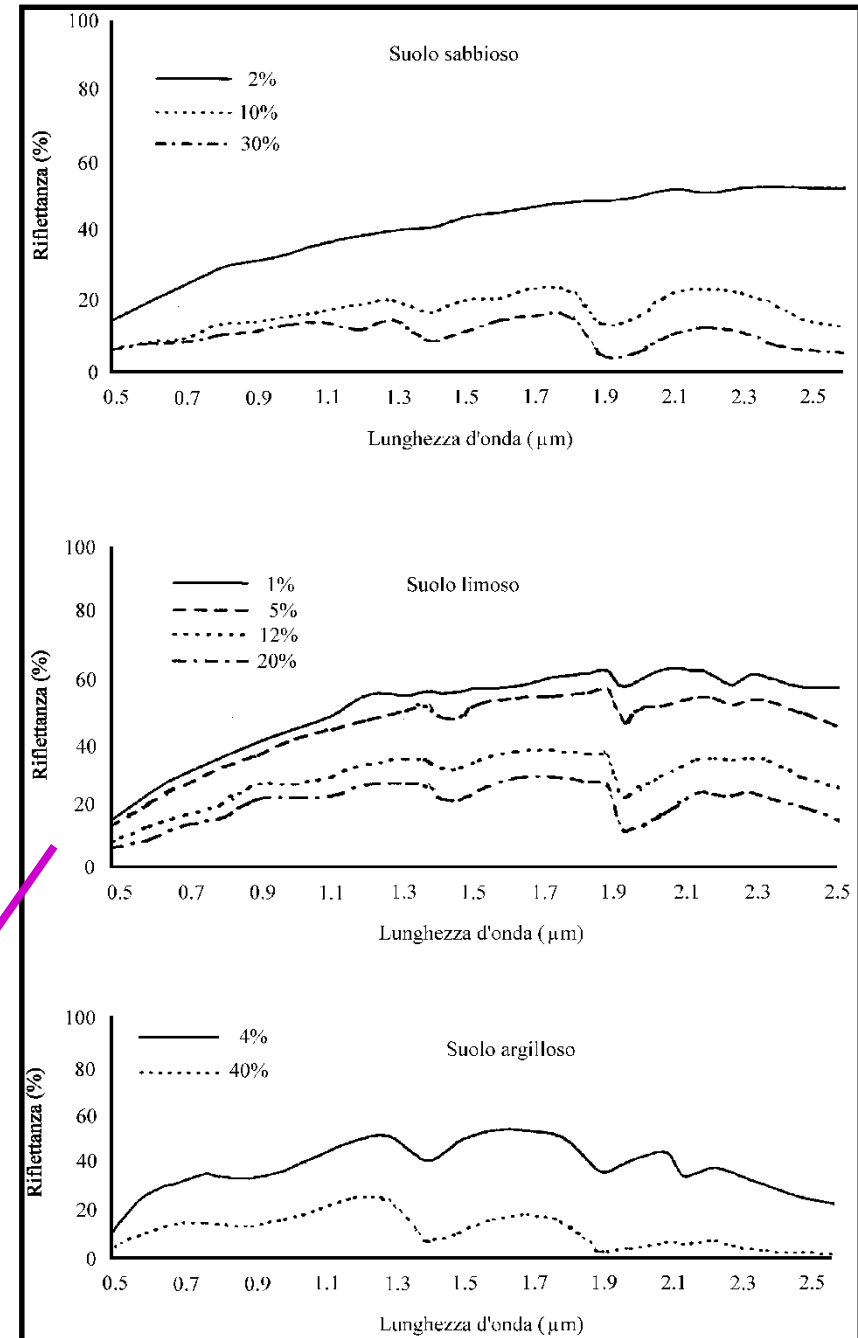
Tante informazioni

# Firma spettrale del suolo e delle rocce

Fattori che ne influenzano la riflettività:

- composizione mineralogica;
- contenuto d'acqua (umidità del suolo);
- tessitura e struttura;
- rugosità superficiale;
- fattori esterni.

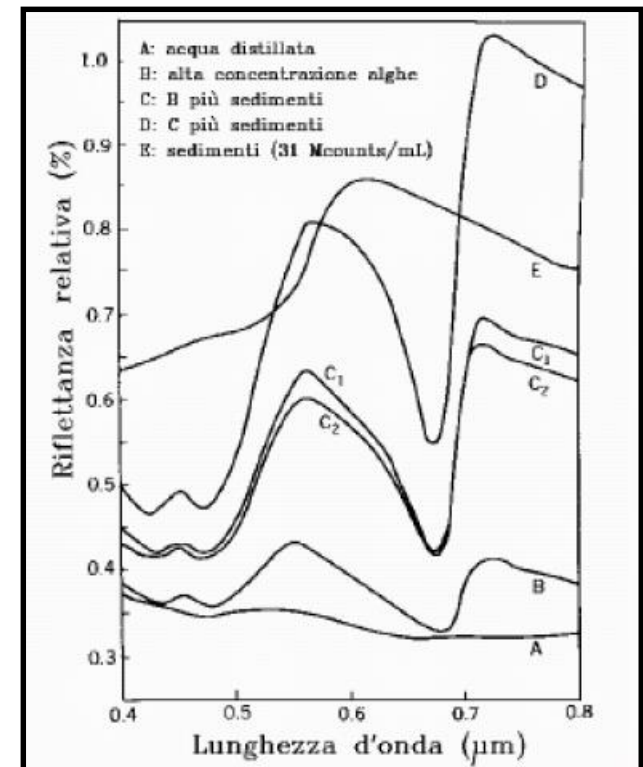
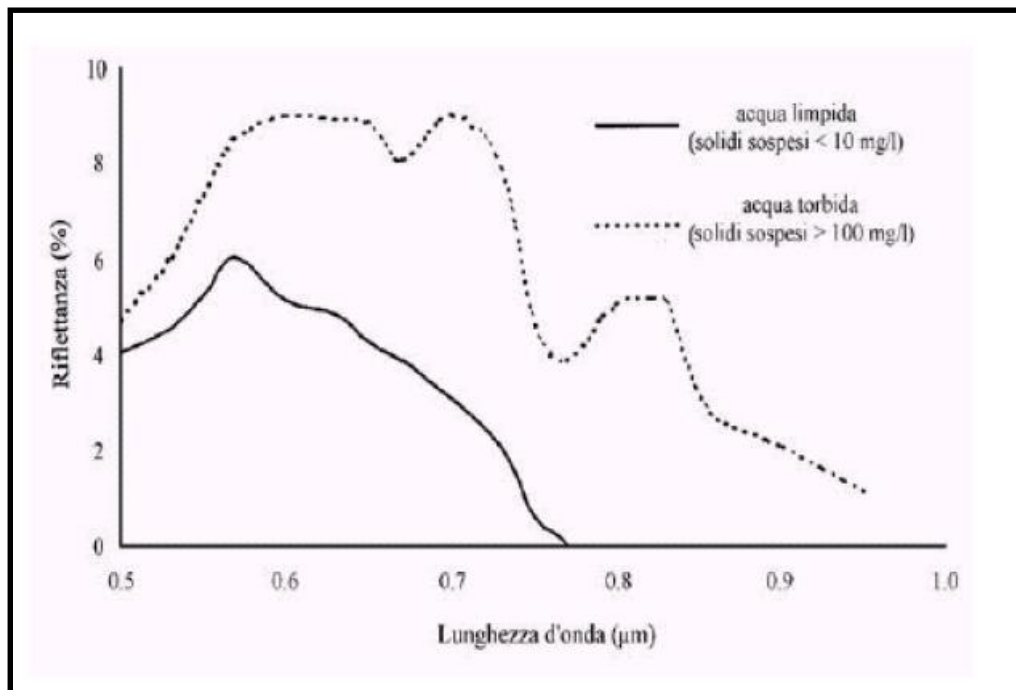
L'aumento delle dimensioni delle particelle determina una riduzione di  $\rho$  in tutto lo spettro.



## Firma spettrale dell'acqua

Fattori che ne influenzano la riflettività:

- materiale in sospensione;
- contenuto di clorofilla;
- rugosità della superficie.

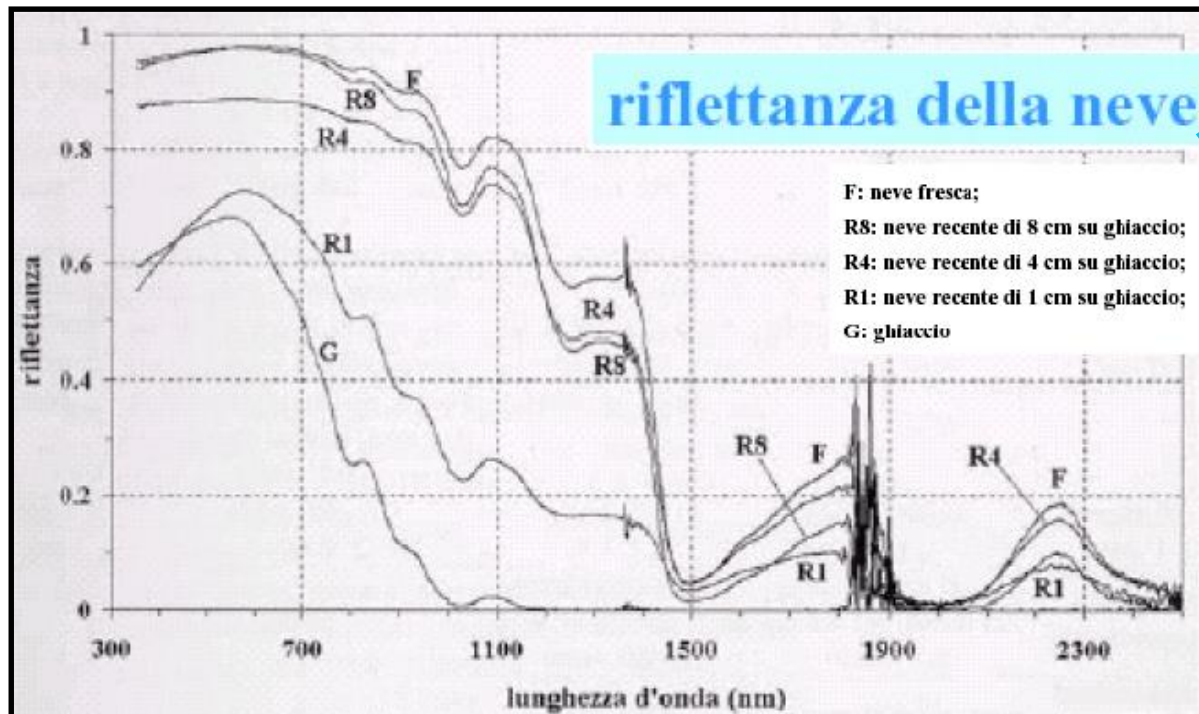
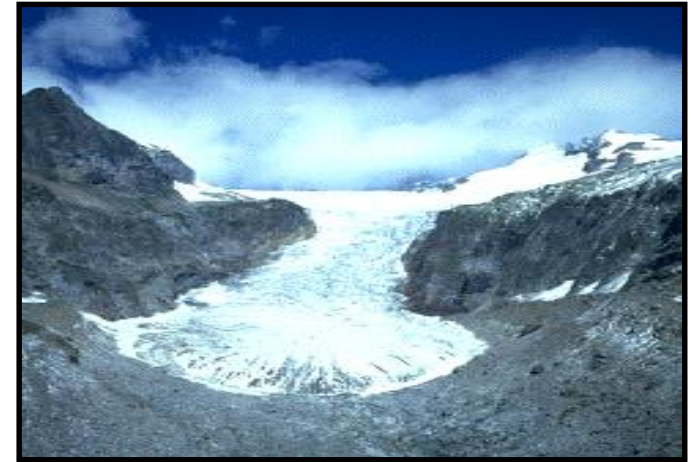




## Firma spettrale della neve e del ghiaccio

Fattori che ne influenzano la riflettività:

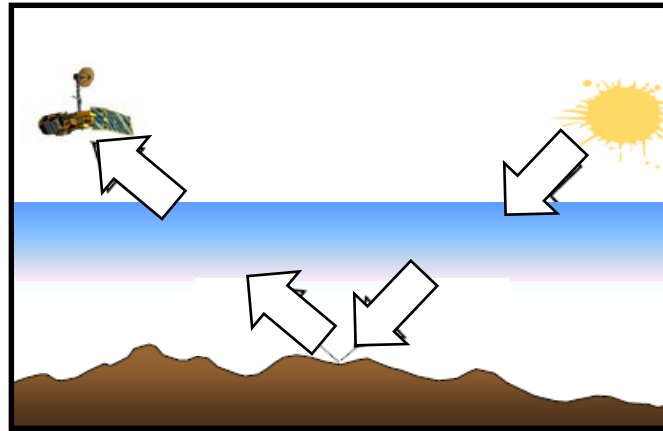
- spessore e grado di compattezza;
- presenza di impurità e mistura con il suolo;
- dimensione dei cristalli.



La  $\rho$  della neve recente è più bassa di quella della neve asciutta a causa dell'elevato coefficiente di assorbimento dell'acqua e del ghiaccio.

La differente risposta delle superfici, in termini di riflettività, è alla base delle tecniche di telerilevamento; in linea di principio è possibile esplorare, in varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, la riflettività di una superficie mediante lo **spettrometro** e conoscendo il suo comportamento, classificarla in base alla firma spettrale.

Nella pratica, però, il risultato delle misure è influenzato dalla proprietà di trasmissione dell'atmosfera interposta fra superficie in osservazione e sensore essa, infatti, agisce come un velo che limita le caratteristiche del sensore impiegato.



Nella realtà operativa, quindi, le curve di riflettanza spettrale non sono così caratteristiche come quelle precedentemente illustrate, ma variano notevolmente a causa delle condizioni ambientali degli strati dell'atmosfera attraversati .