

Niccolò Dainelli

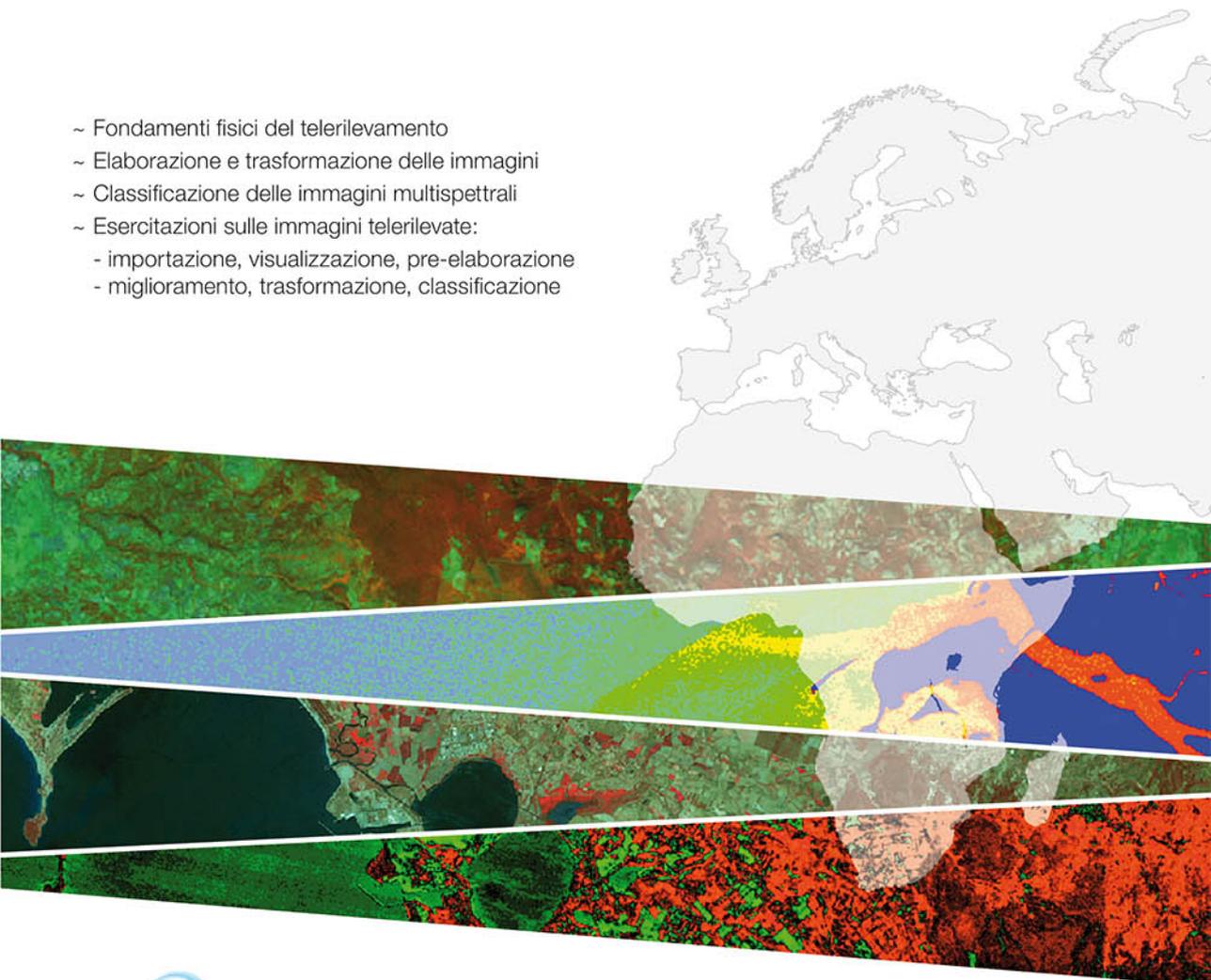
L'osservazione della Terra

Telerilevamento

Manuale teorico-pratico per l'elaborazione
delle immagini digitali

Nel CD allegato esercizi con ILWIS 3.7

- ~ Fondamenti fisici del telerilevamento
- ~ Elaborazione e trasformazione delle immagini
- ~ Classificazione delle immagini multispettrali
- ~ Esercitazioni sulle immagini telerilevate:
 - importazione, visualizzazione, pre-elaborazione
 - miglioramento, trasformazione, classificazione



Niccolò Dainelli

L'OSSERVAZIONE DELLA TERRA
TELERILEVAMENTO

Manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali



Dario Flaccovio Editore

Niccolò Dainelli

L'OSSERVAZIONE DELLA TERRA – TELERILEVAMENTO

Manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali

ISBN 978-88-579-0083-4

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: maggio 2011

Il volume è completato da: L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione

Dainelli, Niccolò <1969->

L'osservazione della terra : telerilevamento: manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali / Niccolò Dainelli. - Palermo : D. Flaccovio, 2011.

ISBN 978-88-579-0083-4

I. Telerilevamento.

621.3678 CDD-22

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, maggio 2011

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Premessa

Parte Prima Telerilevamento teorico

1. I fondamenti fisici del telerilevamento

1.1. Cenni introduttivi.....	»	3
1.2. La natura della radiazione elettromagnetica.....	»	4
1.3. Lo spettro elettromagnetico.....	»	7
1.4. Le grandezze radiometriche	»	7
1.5. L'emissione di energia da parte della materia.....	»	8
1.6. L'interazione della radiazione con l'atmosfera.....	»	11
1.7. L'interazione della radiazione con la superficie terrestre	»	14
1.8. Le firme spettrali	»	16

2. Sistemi di ripresa

2.1. Cenni introduttivi.....	»	19
2.2. Sensori attivi e passivi	»	19
2.3. I tipi di piattaforma per il telerilevamento.....	»	21
2.3.1. Piattaforme satellitari.....	»	21
2.3.2. Piattaforme aeree.....	»	23
2.3.3. Piattaforme al suolo.....	»	24
2.4. I sensori per il telerilevamento	»	25
2.4.1. Sensori ottici passivi non fotografici	»	26
2.5. La risoluzione degli strumenti.....	»	28
2.5.1. Risoluzione geometrica	»	29
2.5.2. Risoluzione spettrale	»	30
2.5.3. Risoluzione radiometrica.....	»	31
2.5.4. Risoluzione temporale.....	»	32
2.6. Panoramica dei principali satelliti e sensori per il telerilevamento.....	»	32
2.6.1. Cenni introduttivi	»	32
2.6.2. Le bande spettrali.....	»	33
2.6.3. I sensori	»	34
2.6.3.1. La famiglia dei satelliti Landsat	»	35
2.6.3.2. I satelliti francesi Spot.....	»	36
2.6.3.3. I satelliti indiani.....	»	38
2.6.3.4. Il sensore ASTER.....	»	41
2.6.3.5. I sensori commerciali ad altissima risoluzione.....	»	42

2.6.3.6. I satelliti israeliani della serie EROS.....	»	46
2.6.3.7. I sensori aerotrasportati multispettrali e iperspettrali	»	47
2.6.3.8. I sensori prossimamente in orbita.....	»	49

3. L'elaborazione e la trasformazione delle immagini da telerilevamento

3.1. Le caratteristiche delle immagini telerilevate	»	51
3.1.1. Il concetto di immagine digitale	»	51
3.1.2. L'istogramma e lo scatterogramma	»	53
3.1.3. Brevi cenni sulla teoria dei colori	»	57
3.1.4. Le composizioni a veri e falsi colori	»	59
3.2. Pre-elaborazioni: correzioni geometriche e radiometriche	»	61
3.2.1. Cenni introduttivi	»	61
3.2.2. Gli errori radiometrici e la loro correzione	»	61
3.2.3. Le distorsioni geometriche e la loro correzione	»	63
3.2.3.1. Definizione del sistema geodetico-cartografico	»	65
3.2.3.2. I GCP	»	66
3.2.3.3. La funzione di trasformazione.....	»	68
3.2.3.4. Valutazione della trasformazione: l'errore quadratico medio	»	69
3.2.3.5. Il ricampionamento.....	»	71
3.3. Il miglioramento delle immagini.....	»	72
3.3.1. Gli scopi del miglioramento	»	72
3.3.2. Il miglioramento mediante operatori puntuali	»	72
3.3.2.1. <i>Grey level thresholding</i> (soglia di toni di grigio)	»	72
3.3.2.2. <i>Level slicing</i>	»	73
3.3.2.3. <i>Contrast stretching</i>	»	73
3.3.3. Il miglioramento mediante operatori locali	»	77
3.4. La trasformazione delle immagini.....	»	81
3.4.1. Cenni introduttivi	»	81
3.4.2. Le operazioni fra bande spettrali	»	81
3.4.2.1. Somma	»	62
3.4.2.2. Differenza	»	62
3.4.2.3. Moltiplicazione	»	62
3.4.2.4. Divisione	»	83
3.4.3. Gli indici di vegetazione.....	»	83
3.4.4. L'analisi delle componenti principali	»	86
3.4.5. La fusione dati (<i>pan-sharpening</i>)	»	91

4. La classificazione delle immagini multispettrali

4.1. Cenni introduttivi.....	»	93
4.2. La classificazione supervisionata.....	»	94
4.2.1. La fase di <i>training</i>	»	94

4.2.2. I tipi di classificatore più usati.....	»	95
4.2.3. Verifica dell'accuratezza.....	»	99
4.3. La classificazione non supervisionata.....	»	100

Parte Seconda Telerilevamento applicato

5. Introduzione alle esercitazioni

5.1. Cenni introduttivi.....	»	103
5.2. Le immagini disponibili	»	103
5.3. Il percorso logico delle esercitazioni	»	105

6. Introduzione al software ILWIS

6.1. Cenni introduttivi.....	»	107
6.2. Introduzione a ILWIS 3.x	»	108
6.2.1. Installare ILWIS	»	109
6.2.2. Lanciare ILWIS	»	109
6.2.3. Il NAVIGATOR	»	110
6.2.4. Il CATALOG	»	111
6.2.5. Gli oggetti di ILWIS	»	111
6.2.5.1. I <i>data objects</i>	»	112
6.2.5.2. I <i>service objects</i>	»	113
6.2.5.3. Gli <i>special objects</i>	»	114
6.2.5.4. I <i>container objects</i>	»	115
6.2.6. Le barre del titolo e del menu.....	»	115
6.2.7. L'OPERATION-TREE e l'OPERATION-LIST	»	116
6.2.8. La STATUS BAR.....	»	116
6.2.9. Le toolbar della MAIN WINDOW	»	117
6.2.10. L'HELP in linea e la documentazione.....	»	118

7. Esercitazione: importazione e visualizzazione delle immagini telerilevate in ILWIS

7.1. Cenni introduttivi e DATASET	»	121
7.2. La procedura di importazione	»	123
7.2.1. Esercizi	»	128
7.3. Visualizzazione di dati telerilevati e loro proprietà.....	»	129
7.3.1. Esercizi	»	143
7.4. L'istogramma	»	143
7.4.1. Esercizi.....	»	146

8. Esercitazioni di pre-elaborazione di immagini telerilevate

8.1. Cenni introduttivi e scopi	»	149
---------------------------------------	---	-----

8.2.	La trasformazione da valori di <i>digital number</i> a valori di radianza.....	»	150
8.3.	Applicazione di un semplice algoritmo di correzione atmosferica	»	157
8.4.	La conversione da valori di radianza a valori di temperatura di brillanza ...	»	164
8.4.1.	Esercizi	»	166
8.5.	Un esempio di correzione geometrica: la registrazione immagine-immagine	»	167

9. Esercitazioni di miglioramento di immagini telerilevate

9.1.	Cenni introduttivi e scopi	»	177
9.2.	Esercizi di miglioramento mediante operatori puntuali.....	»	177
9.2.1.	Applicazione di soglie di livelli di grigio con il <i>grey level thresholding</i>	»	177
9.2.2.	Una semplice classificazione dell'immagine: il <i>density slicing</i>	»	183
9.2.3.	Il miglioramento del contrasto attraverso il <i>contrast stretching</i>	»	187
9.2.3.1.	Lo <i>stretching lineare</i> : applicazione temporanea	»	187
9.2.3.2.	Lo <i>stretching lineare</i> : applicazione permanente	»	195
9.2.3.3.	L'equalizzazione dell'istogramma	»	197
9.3.	Esercizi di miglioramento mediante operatori locali	»	199
9.3.1.	Applicazione di filtri passa-basso (<i>smoothing</i>)	»	199
9.3.2.	Applicazione di filtro passa-alto (<i>edge enhance</i>)	»	202
9.3.3.	Esercizi	»	205

10. Esercitazioni di trasformazione delle immagini telerilevate

10.1.	Cenni introduttivi e scopi	»	207
10.2.	Operazioni fra bande spettrali	»	207
10.2.1.	Applicazione della sottrazione fra bande: il <i>change detection</i>	»	207
10.2.2.	Applicazione del rapporto di banda: gli indici di vegetazione.....	»	214

11. Esercitazioni di classificazione delle immagini telerilevate

11.1.	Cenni introduttivi e scopi	»	223
11.2.	Classificazione non supervisionata	»	223
11.2.1.	Esercizi	»	228
11.3.	Classificazione supervisionata	»	228
11.3.1.	Esempi di classi di copertura del suolo	»	229
11.3.2.	Preparazione alla fase di <i>training</i>	»	231
11.3.3.	Acquisizione delle aree di <i>training</i>	»	233
11.3.4.	Fase di classificazione	»	236
11.3.5.	Fase di post-classificazione	»	239
11.3.6.	Esercizi	»	241

Bibliografia.....	»	243
-------------------	---	-----

Ringraziamenti.....	»	245
---------------------	---	-----

PREMESSA

Dal 1972, quando il primo satellite della famiglia Landsat è stato messo in orbita, il telerilevamento per l'osservazione della Terra ha fatto passi da gigante. Attualmente, i satelliti commerciali riescono a fornire immagini con una definizione fino a 50 cm, rendendo la superficie del nostro Pianeta ormai virtualmente priva di segreti. Altri sensori possono osservare gli oggetti in bande dello spettro elettromagnetico così piccole da riconoscere il materiale di cui sono fatti. L'orbita terrestre pullula di satelliti artificiali, molti dei quali destinati all'osservazione della Terra e sempre di più ne vengono lanciati ogni anno.

Oggi più che mai, il telerilevamento, cioè l'attività di "rilevare da lontano", è una tecnica che può dare ottimi risultati per lo studio del territorio, spesso evitando anche di visitare il sito investigato. È evidente che il controllo a terra è da considerare uno strumento di verifica auspicabile, ma non sempre e ovunque esso è realizzabile. Ai giorni nostri non solo esistono luoghi ancora difficilmente raggiungibili per mancanza d'infrastrutture viarie, ma aumentano sempre più le regioni pericolose in cui è sconsigliabile o addirittura vietato recarsi. Il telerilevamento, in queste situazioni, risulta quindi l'unica metodologia per ottenere dati e informazioni su una certa area geografica.

Per il telerilevamento sono impiegati strumenti definiti *sensori*, montati prevalentemente su piattaforme satellitari e aeree, che danno come prodotto principale *immagini digitali* rappresentanti porzioni della superficie terrestre. Questi dati costituiscono la base di partenza per l'estrazione di una gran quantità di informazioni riguardanti l'ambiente, le risorse naturali e antropiche, la copertura del suolo, la geologia e la geomorfologia, tanto per citarne una piccola parte. Tali informazioni possono essere ricavate in maniera automatica o semi-automatica attraverso algoritmi matematici o mediante l'analisi delle immagini da parte di un interprete umano e poi rappresentate tramite cartografia tematica.

Questo volume, che costituisce il primo di *L'osservazione della Terra*, è stato scritto con lo scopo di affrontare il tema del telerilevamento da un punto di vista marcatamente applicativo, fornendo comunque le necessarie basi teoriche sull'argomento, ma dedicando una buona parte del testo allo svolgimento di esercizi pratici dedicati alle principali elaborazioni necessarie per preparare le immagini all'uso, migliorarne il contrasto ed estrarne informazioni attraverso procedure

automatiche o semi-automatiche. La parte dedicata all'estrazione di informazioni mediante interpretazione invece è trattata nel secondo volume, *L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione*.

Gli esercizi proposti nel testo fanno uso di immagini da satellite messe a disposizione per esclusivo uso didattico da società e organizzazioni di distribuzione delle stesse e sono memorizzate nel DVD allegato al libro. Per ogni elaborazione la procedura viene spiegata passaggio dopo passaggio dando al lettore la possibilità di ripeterla applicandola a un'immagine diversa.

Dato il suo approccio didattico, questo testo è stato scritto pensando allo studente universitario quale naturale destinatario ma perfettamente si adatta a qualunque figura tecnica o professionale che voglia avvicinarsi a questa disciplina con un approccio operativo.

Trattandosi di un testo di base, si è inoltre scelto volutamente di mantenere un livello appropriato, per cui alcuni argomenti non sono stati affrontati in maniera eccessivamente dettagliata, rimandandone l'approfondimento a opere specifiche segnalate in bibliografia.

PARTE PRIMA
Telerilevamento teorico

1. I FONDAMENTI FISICI DEL TELERILEVAMENTO

1.1. Cenni introduttivi

La percezione dell'ambiente circostante da parte dell'uomo e di altri animali avviene attraverso gli occhi, organi capaci di captare la luce e inviare il suo contenuto informativo al cervello, dove avviene il processo interpretativo che permette il riconoscimento degli oggetti osservati. Un sistema di questo tipo è costituito quindi da più sottosistemi: un ambiente in cui sono presenti elementi oggetto d'indagine, una fonte di luce o in generale di energia (o radiazione) elettromagnetica, la quale funge da mezzo di trasporto delle informazioni riguardo agli elementi dell'ambiente, un organo capace di sentire la luce, che può essere definito pertanto *sensore*, e un altro organo preposto all'interpretazione dei segnali inviati dal sensore. Attraverso il funzionamento di questo sistema, l'uomo può condurre osservazioni o rilevamenti su ciò che lo circonda, al fine di trarne conoscenze e informazioni utili per la propria vita.

Questi rilevamenti possono essere condotti a distanza ravvicinata o da lontano: osservazioni di dettaglio hanno bisogno che l'oggetto dell'indagine sia molto vicino, mentre la possibilità di esaminare un insieme di oggetti o un'area del nostro pianeta da lontano spesso permette di avere una visione più completa e chiara. Non per nulla, fin da tempi remoti, l'uomo ha sempre cercato di guadagnare posizioni elevate, quali ad esempio i rilievi montuosi, per condurre migliori osservazioni, sia che si trattasse di sorvegliare greggi o mandrie sia che dovesse tenere sott'occhio ampie porzioni di territorio per individuare con largo anticipo l'arrivo di nemici o degli amici. In tempi più recenti, le posizioni vantaggiose sono diventate prima i palloni aerostatici, poi i dirigibili, gli aeroplani, gli elicotteri e infine i satelliti, aumentando sempre più l'altezza da terra (quindi la distanza di osservazione) e la quantità di superficie osservabile, che è passata da qualche decina di chilometri quadrati a virtualmente l'intero pianeta Terra.

Alla luce di queste considerazioni preliminari, si può affermare che anche se il rilevamento da lontano è una tecnica antica quanto l'uomo e forse anche di più, se si considerano i suoi antenati e altri animali, ha cominciato ad assumere il ruolo di disciplina scientifica quando i mezzi e le tecniche di osservazione hanno iniziato a standardizzarsi e soprattutto quando al semplice occhio umano si sono

sostituiti, o per meglio dire affiancati, sensori artificiali capaci innanzitutto di fissare su supporti più o meno permanenti le immagini rilevate, ma anche di captare l'energia elettromagnetica al di fuori dei limiti imposti per natura all'occhio umano e quindi osservare cose che l'uomo di per sé non potrà mai vedere. Quel momento può essere considerato quale inizio del telerilevamento vero e proprio (dal greco *tele* = 'lontano' e rilevamento), ossia un insieme di tecniche e metodologie per l'acquisizione a distanza e l'interpretazione di dati relativi a oggetti e fenomeni localizzati in un intorno della superficie della Terra. Il telerilevamento inteso in questo senso prevede nella maggior parte dei casi che l'osservazione di tale superficie sia fatta guardando dall'alto verso il basso e, di solito ma non sempre, perpendicolarmente a essa.

Dai concetti espressi finora appare evidente che l'energia elettromagnetica rappresenta un elemento fondamentale affinché si possa fare del telerilevamento e che le proprietà della radiazione EM assumono una grande importanza per il riconoscimento sia di oggetti sia di fenomeni e per lo studio delle loro caratteristiche. Per questo motivo, il presente capitolo sarà dedicato alla trattazione dei fondamenti fisici su cui il telerilevamento si basa, cercando di mantenere a un livello sufficientemente elementare l'argomento e rimandando, per eventuali approfondimenti, a testi specifici.

1.2. La natura della radiazione elettromagnetica

Come si è accennato nel precedente paragrafo, la luce costituisce il mezzo che trasporta agli occhi dell'uomo le informazioni sull'ambiente circostante. Però è lecito chiedersi cosa sia effettivamente la luce.

In fisica, si definisce *energia* la capacità di produrre *lavoro*. Esistono differenti tipi di energia: chimica, elettrica, meccanica, ecc. Durante la produzione del lavoro, l'energia viene trasferita da un corpo a un altro e ciò può avvenire in tre diversi modi: per *conduzione*, per *convezione* e per *radiazione*. Mentre le prime due forme di trasferimento presuppongono il contatto fra i corpi o il movimento di corpi essi stessi portatori di energia, la radiazione è l'unico modo che permette la propagazione di energia attraverso il vuoto o un mezzo. La luce è propriamente una forma di propagazione di energia attraverso radiazione e più in particolare una piccola parte della più generale radiazione elettromagnetica, che comprende altre forme quali i raggi x, le microonde e le onde radio, tanto per citarne alcune comunemente conosciute. In altri termini, si può dire che la radiazione elettromagnetica rappresenta un sistema di propagazione dell'energia da un corpo a un altro attraverso lo spazio ed è particolarmente importante sottolineare che le modalità di propagazione e di interazione di tale energia con i corpi possono fornire informazioni utili per lo studio del mondo che ci circonda.

Secondo le teorie attualmente accettate e utilizzate sperimentalmente dalla fisica,

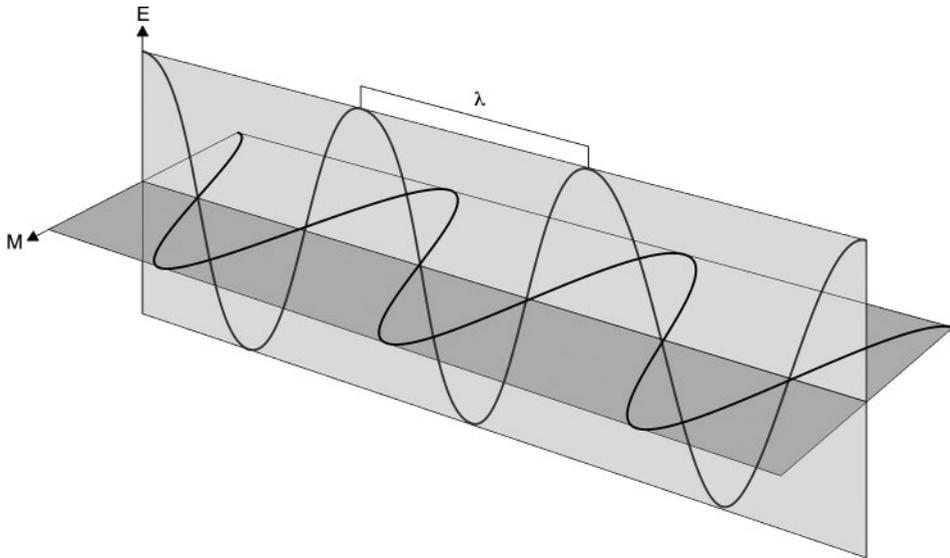


Figura 1.1. Schema dell'onda elettromagnetica con i piani di vibrazione ortogonali del campo elettrico E e di quello magnetico M

la radiazione elettromagnetica (da ora in poi radiazione EM) può essere interpretata in due diversi modi: assimilandola a un'onda o come un insieme di particelle. Secondo la cosiddetta *teoria ondulatoria*, la radiazione EM si propaga nello spazio come un'onda armonica che oscilla su due piani ortogonali fra loro e rispetto alla direzione di propagazione, rappresentanti il campo elettrico e quello magnetico generati dalla radiazione stessa (si veda figura 1.1). La distanza fra due picchi o depressioni dell'onda viene definita *lunghezza d'onda* (simbologgiata con la lettera greca λ), espressa di solito in micrometri ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$) o nanometri ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$).

L'altra grandezza che caratterizza l'onda in questione rappresenta il numero di picchi che passano da un dato punto nell'unità di tempo (un secondo) durante la propagazione e viene definita *frequenza* (simbolo ν). Questa è invece espressa in cicli al secondo, ossia Hertz (Hz). Esiste una relazione che lega queste due grandezze caratteristiche ed è tale per cui il loro prodotto è costante e pari alla velocità di propagazione dell'onda stessa:

$$c = \lambda \nu \text{ m/s} \quad (1.1)$$

Il valore di tale velocità è $299.792.458 \text{ m/s}$ ed essa è anche conosciuta come *velocità della luce*. In realtà, è la velocità di qualunque tipo di radiazione elettromagnetica. Si noti che le due grandezze, lunghezza d'onda e frequenza, sono inversamente proporzionali fra loro, il che significa che un'onda a bassa frequenza avrà lunghezza d'onda grande e viceversa.

Oltre alla teoria ondulatoria, che spiega molte delle caratteristiche della radiazio-

ne EM, un'altra teoria, definita come *quantistica*, fornisce le spiegazioni per altre proprietà. In particolare, questa teoria sostiene che la radiazione EM è trasportata da unità discrete chiamate *fotoni* o *quanti*, particelle che trasmettono da una fonte a un bersaglio proprietà tipiche dei corpi quali energia e momento, ma senza possedere una massa. L'energia quindi viene trasmessa non in maniera continua ma a *pacchetti*. Secondo l'equazione postulata da Max Planck nel 1901, l'energia Q di un fotone (espressa in Joule) è data da:

$$Q = h\nu \quad \text{Joule} \quad (1.2)$$

dove

h = costante di Planck e vale $6,62606 \cdot 10^{-34}$ Joule sec

ν = frequenza dell'onda elettromagnetica.

Se si risolve l'equazione (1.1) per ν , la (1.2) può essere scritta:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Dalle due relazioni (1.2) e (1.3) si può dedurre che l'energia di un quanto (o fotone) è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda a esso associata e inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda: maggiore è la lunghezza d'onda, quindi, minore è l'energia trasportata. Questo fatto ha importanti implicazioni in telerilevamento, in quanto certe forme di radiazione EM a grande lunghezza d'onda emesse naturalmente dalla superficie terrestre sono più difficili da captare da parte dei sensori rispetto ad altre con valori di λ minori. Un esempio può essere quello delle microonde emesse naturalmente dalla superficie terrestre, la cui energia è di gran lunga inferiore rispetto a quella trasportata per esempio dalla radiazione infrarossa.

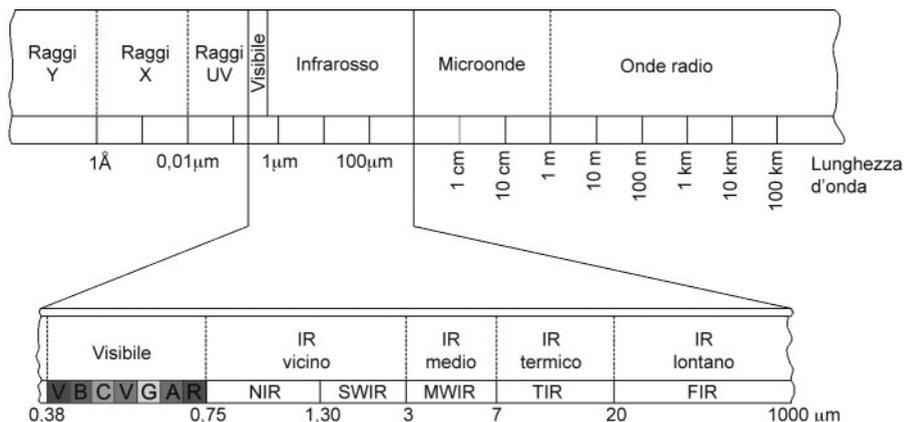


Figura 1.2. Lo spettro elettromagnetico

1.3. Lo spettro elettromagnetico

Si è detto che la luce è una piccola parte della radiazione elettromagnetica. Per essere più precisi, si dovrebbe puntualizzare che con il termine “luce” si intende la radiazione cosiddetta *visibile* da parte dell’uomo. Essa, assieme ad altre tipologie di radiazione, forma lo *spettro elettromagnetico* (figura 1.2) che altro non è che la rappresentazione su un asse di tutte le lunghezze d’onda suddivise in regioni, definite *bande spettrali*. Queste bande, denominate in base a vari criteri anche di origine storica, hanno confini puramente arbitrari, essendo lo spettro in realtà un *continuum* di lunghezze d’onda.

Ai fini del telerilevamento, le regioni più significative sono:

- ultravioletto (UV), da 0,01 a 0,380 μm ;
- visibile (V), da 0,38 a 0,75 μm ;
- infrarosso (IR), da 0,75 a 1000 μm ;
- microonde (MW), da 0,1 a 100 cm.

Come si può osservare dalla lista, la regione del visibile – l’unica percepibile dall’occhio umano – occupa una porzione di spettro estremamente limitata pari a 0,37 μm di estensione. All’interno di questa regione è possibile individuare in maniera approssimativa le zone spettrali in cui si trovano le lunghezze d’onda che l’occhio umano percepisce come colori, raggruppabili in tre fondamentali:

- il blu (da 0,38 a 0,5 μm);
- il verde (da 0,5 a 0,6 μm);
- il rosso (da 0,6 a 0,75 μm).

Un’altra regione particolarmente importante, che occupa una zona più ampia, è l’infrarosso. Esso è suddiviso in varie sotto-zone definite in base alla loro progressiva lontananza dal visibile: adiacente a quest’ultimo è l’infrarosso vicino (VIR), da 0,75 a 3 μm , a cui seguono l’infrarosso medio (MIR), da 3 a 7 μm , l’infrarosso lontano o termico (TIR), da 7 a 20 μm e infine l’infrarosso estremo (FIR), da 20 a 1000 μm .

1.4. Le grandezze radiometriche

In questo paragrafo si descriveranno le grandezze in gioco nel processo di propagazione dell’energia elettromagnetica. Una di esse è stata già citata al paragrafo 1.2 ed è l’energia Q trasmessa da un fotone (o, in altri termini, dall’onda elettromagnetica). Essa prende il nome di *energia radiante* ed è espressa in Joule. Ciò che però interessa in telerilevamento non è tanto l’energia in sé, ma la quantità di essa trasportata in un certo tempo. Per questo, si definisce il *flusso di energia radiante*:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.4)$$

Il flusso radiante rappresenta quindi l'energia trasportata nell'unità di tempo, è espresso in Watt e quindi è in tutto e per tutto una potenza.

Di interesse è anche conoscere il flusso di energia che passa attraverso una certa area A , sia che esso stia fuoriuscendo da una fonte energetica sia che stia incidendo su un dato corpo. Nel primo caso si parla di *exitanza*, espressa in $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2}$ e definita da:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.5)$$

Nel secondo caso viene definita invece l'*irradianza*, anch'essa espressa in $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.6)$$

Una terza grandezza esprime il flusso radiante attraverso una data area e un certo angolo di osservazione. Questa è la *radianza* L , espressa in $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, dove sr rappresenta lo steradiano, ossia un angolo solido:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (1.7)$$

dove

θ = angolo di osservazione

ω = normale alla superficie osservata.

Quest'ultima grandezza radiometrica è la più importante in telerilevamento, poiché è quella effettivamente misurata dal sensore.

Le grandezze appena descritte possono variare al variare della lunghezza d'onda, il che significa che ogni tipologia di radiazione elettromagnetica sarà caratterizzata da valori tipici delle suddette grandezze.

Per questo, si definiscono, al variare della lunghezza d'onda, le seguenti:

▪ *flusso radiante spettrale* $\Phi_{(\lambda)} = d\Phi/d\lambda$ (1.8)

▪ *exitanza spettrale* $M_{(\lambda)} = dM/d\lambda$ (1.9)

▪ *irradianza spettrale* $E_{(\lambda)} = dE/d\lambda$ (1.10)

▪ *radianza spettrale* $L_{(\lambda)} = dL/d\lambda$ (1.11)

1.5. L'emissione di energia da parte della materia

Qualunque corpo che si trovi a temperatura superiore allo zero assoluto genera ed emette energia elettromagnetica. Questa emissione avviene in virtù dello stato di costante eccitazione in cui si trovano le particelle costituenti la materia. Ogni sorgente di energia o *radiatore* emette una serie caratteristica di onde elettromagnetiche che può essere definita in base alla loro lunghezza d'onda e intensità. Diagram-

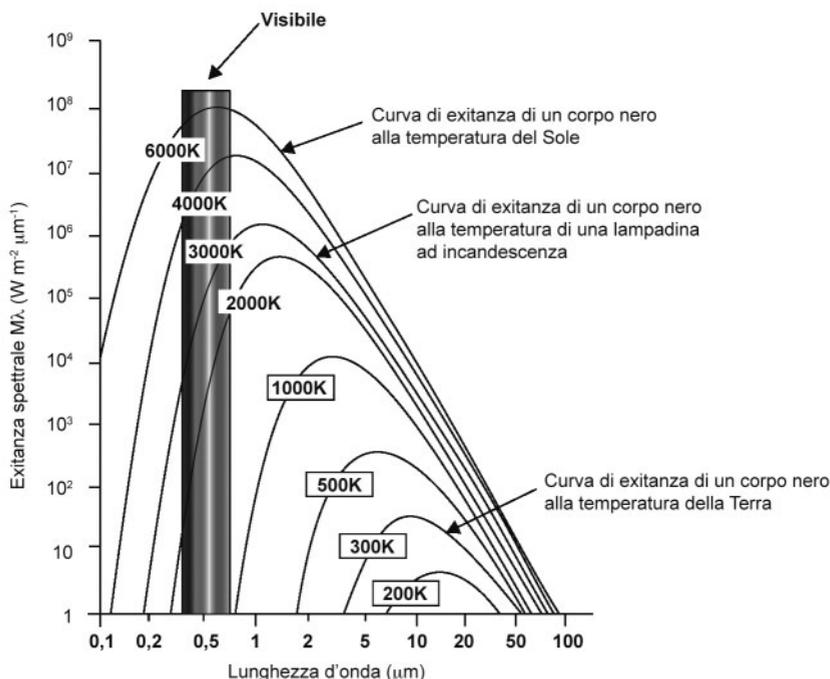


Figura 1.3. Curve di exitanza spettrale di alcuni corpi conosciuti

mando la prima rispetto alla seconda, è possibile ricostruire una curva caratteristica chiamata *firma di emissione spettrale* che è diversa da radiatore a radiatore.

In fisica, nell'ambito dello studio del trasporto energetico per radiazione, è stato introdotto un concetto molto utile che è quello del cosiddetto *corpo nero*. Esso è un ipotetico oggetto o sostanza capace di assorbire tutta la radiazione incidente su di esso e di emettere la massima quantità di radiazione a tutte le temperature. Quindi è allo stesso tempo un assorbente e un radiatore perfetto. In natura non esiste un corpo siffatto, per quanto se ne sa, ma molte volte, per descrivere il comportamento del mondo reale, si definiscono modelli che in qualche maniera aiutano nello scopo e questo concetto ha facilitato molto nella formulazione delle leggi fisiche che regolano il comportamento dei radiatori reali e che adesso si andranno a enunciare.

La *legge di Planck* definisce il valore dell'exitanza M a una data lunghezza d'onda λ caratterizzante un corpo nero che si trovi alla temperatura T . Questa relazione è espressa come:

$$M_{(\lambda,T)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{(C_2/\lambda T)} - 1 \right)} \tag{1.12}$$

dove

C_1 e C_2 = costanti universali:

$$C_1 = 37,413 \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-2}$$

$$C_2 = 14.388 \mu\text{m K}.$$

L'importante considerazione che deriva da questa legge è che per ogni corpo, a una data temperatura T , è possibile conoscere l'andamento dell'exitanza in funzione della lunghezza d'onda, ossia lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Si veda per esempio la figura 1.3 dove sono mostrati alcuni corpi conosciuti.

La *legge di Stefan-Boltzmann* mette in relazione la potenza di emissione di un corpo nero (l'exitanza M) rispetto alla sua temperatura T , secondo la seguente equazione:

$$M = \sigma T^4 \quad (1.13)$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann che vale $5,6704 \cdot 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Come si può osservare, il flusso energetico uscente da un corpo nero è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura, il che significa che il primo aumenta molto velocemente all'aumentare della seconda. Si noti comunque che questa relazione ha valore per lunghezze d'onda più corte delle microonde, dove invece M varia come una funzione diretta di T . In sintesi, la legge di Stefan-Boltzmann sostiene che un radiatore più caldo emette molta più energia per unità di area rispetto a un radiatore più freddo.

I corpi reali, non possedendo le proprietà ideali del corpo nero, tendono a emettere meno energia rispetto a quest'ultimo. Il confronto fra l'exitanza M_{cg} di un corpo reale (definito anche come *corpo grigio*) e quella del corpo nero M può essere definito attraverso il rapporto fra le due grandezze, il cui risultato è una grandezza definita come emissività ε . La relazione appena definita è la *legge di Kirchhoff* espressa dalla seguente equazione:

$$\varepsilon = \frac{M_{cg}}{M} \quad (1.14)$$

Da essa risulta che l'emissività di un corpo nero è 1, mentre quella di un qualunque corpo grigio è minore di 1. Dato che l'emissività dei corpi reali varia al variare della lunghezza d'onda, si può enunciare la legge appena citata in funzione di quest'ultima:

$$\varepsilon_{(\lambda)} = \frac{M_{cg(\lambda)}}{M_{(\lambda)}} \quad (1.15)$$

L'emissività spettrale $\varepsilon_{(\lambda)}$ è una grandezza che indica l'efficienza radiativa di un corpo attraverso l'intero spettro elettromagnetico.

La *legge di Wien* definisce la relazione fra la lunghezza d'onda corrispondente

alla massima exitanza (λ_{\max}) e la temperatura del corpo nero T . In particolare, si ha che:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (1.16)$$

Questa equazione mostra che al crescere della temperatura del corpo nero la lunghezza d'onda dominante della radiazione emessa tende a spostarsi lungo lo spettro verso valori piccoli. Un esempio tipico per spiegare questo fenomeno è quello del Sole e della Terra (si veda figura 1.3): il primo ha una temperatura superficiale di circa 6000 K, a cui corrisponde un valore λ_{\max} di 0,483 μm .

La Terra, viceversa, avendo una temperatura della superficie di circa 300 K, emette radiazione nella lunghezza d'onda dominante di 9,66 μm . Ciò effettivamente corrisponde alle osservazioni effettuate, secondo le quali la massima radiazione emessa dal Sole si colloca nella zona del visibile (luce), mentre quella emessa dalla Terra nell'infrarosso termico (calore).

Una conseguenza delle considerazioni appena esposte è che, in generale, i corpi a temperatura più alta tendono a emettere radiazione a lunghezze d'onda più corte, al contrario di quelli a temperatura minore. Il Sole, le stelle, le lampadine a incandescenza, ad esempio, in virtù della loro alta temperatura, emettono radiazione che almeno in parte cade nella regione del visibile, mentre altri corpi più freddi quali, ad esempio, la stessa Terra o gli animali tendono a emettere almeno in parte nella zona dell'infrarosso termico.

1.6. L'interazione della radiazione con l'atmosfera

Indipendentemente dalla sorgente, tutta la radiazione registrata dai sensori per l'osservazione della Terra passa per una certa porzione di atmosfera. Per esempio, un sensore montato su una piattaforma satellitare rileva la radiazione elettromagnetica che, dopo aver attraversato una prima volta tutto lo spessore dell'atmosfera provenendo dal Sole, lo attraversa una seconda dopo essere stata riflessa dalla superficie terrestre. Un sensore termico aerotrasportato registra la radiazione infrarossa emessa dalla Terra, che invece attraversa l'atmosfera una sola volta, dalla superficie terrestre al sensore.

L'effetto dell'atmosfera sulla radiazione elettromagnetica può essere definito genericamente di "disturbo". Si vedrà più avanti in cosa consiste questo disturbo. Innanzitutto va detto che questo effetto varia al variare di diversi parametri, quali:

- la lunghezza del percorso della radiazione nell'atmosfera;
- la magnitudine del segnale elettromagnetico registrato;
- le condizioni atmosferiche;
- la lunghezza d'onda della radiazione coinvolta.

In generale, l'atmosfera può avere un profondo effetto sull'intensità e la composizione spettrale della radiazione che verrà captata da un sensore. Questi effetti sono causati da due meccanismi: quello di *diffusione* e quello di *assorbimento* atmosferico.

La diffusione atmosferica è un processo imprevedibile per il quale la radiazione elettromagnetica, collidendo con le particelle presenti nell'atmosfera, viene dispersa in varie direzioni. Si distinguono tre tipi di diffusione:

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

La diffusione di Rayleigh avviene quando l'energia elettromagnetica interagisce con molecole presenti nell'atmosfera le cui dimensioni sono molto più piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione. L'effetto della diffusione di Rayleigh è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda; ne consegue che la radiazione a piccola lunghezza d'onda viene diffusa maggiormente rispetto a quella a grande lunghezza d'onda. Questo tipo di diffusione è responsabile del colore blu del cielo, poiché la radiazione nella regione spettrale del blu (0,4-0,5 μm) viene dispersa molto di più rispetto a quella a lunghezze d'onda maggiori. La porzione di radiazione nel blu è talmente diffusa che ci appare provenire da tutte le direzioni, donando così al cielo il suo colore. Fra l'altro, più si sale di quota, per esempio in alta montagna o a bordo di un aeroplano e più il blu diventa scuro, in virtù del fatto che la diffusione è sempre minore, diminuendo lo spessore di atmosfera da attraversare. Superata l'atmosfera poi il cielo appare nero. Un esempio sono le fotografie scattate dagli astronauti sulla Luna, dove è visibile il cielo nero nonostante vi sia illuminazione solare.

Nelle immagini telerilevate la diffusione di Rayleigh produce un effetto tipico di foschia che toglie contrasto all'immagine stessa, rendendola offuscata.

La diffusione di Mie si ha quando la radiazione EM interagisce con particelle delle dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda dell'energia registrata. Particelle di questo tipo sono quelle del vapor acqueo e della polvere. Questa diffusione interessa lunghezze d'onda più grandi rispetto a quella di Rayleigh.

Esiste infine un ultimo tipo di diffusione che è definita, come si è detto poc'anzi, *non selettiva* e che si ha quando la radiazione interagisce con particelle molto più grandi della lunghezza d'onda (tipicamente le gocce d'acqua) con dimensioni comunemente comprese fra 5 e 100 μm . Proprio perché interessa indistintamente tutte le lunghezze d'onda del visibile, infrarosso vicino e medio, questo tipo di diffusione viene definita non selettiva. A causa di ciò, i corpi atmosferici contenenti acqua, come le nuvole o la nebbia, appaiono bianchi o biancastri poiché l'insieme di tutti i colori combinati in proporzioni uguali produce la luce bianca. La radiazione a lunghezze d'onda maggiori dell'infrarosso medio, come ad esem-

pio le microonde, non risente di questa diffusione ed è per questo che i radar riescono ad acquisire immagini della superficie terrestre anche con copertura nuvolosa.

In contrapposizione alla diffusione, l'assorbimento atmosferico si traduce in un'effettiva perdita di energia. Di solito, l'assorbimento è selettivo, cioè avviene a determinate lunghezze d'onda. Il vapor acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2) e l'ozono (O_3) sono tipici assorbenti dell'energia elettromagnetica solare. Dal momento che questi gas assorbono specifiche lunghezze d'onda, determinano anche dove il sensore può vedere spettralmente.

Gli intervalli di lunghezza d'onda nei quali l'atmosfera è particolarmente trasmisiva per l'energia EM (cioè dove non assorbe) sono definiti *finestre atmosferiche*. In figura 1.4 è mostrato un diagramma della *trasmittanza* o trasmissione atmosferica. Questa grandezza, espressa in percentuale, definisce la quantità di energia che passa attraverso l'atmosfera in funzione della lunghezza d'onda.

Dove la curva mostra dei picchi, si hanno le cosiddette *finestre di trasmissione atmosferica*, mentre le zone depresse denotano il blocco della radiazione a opera dei diversi gas assorbenti. Vale la pena notare che la regione del visibile, che è l'unica zona di osservazione dell'occhio umano, è una finestra atmosferica e, facendo riferimento alle curve di exitanza (figura 1.3), si potrà constatare che proprio qui si ha il maggior valore di questa grandezza per quanto concerne il Sole. La massima exitanza della Terra si ha invece per valori di lunghezza d'onda intorno a 9-10 micron, dove è presente un'altra finestra di trasmissione. Importanti zone di assorbimento dovute al vapor acqueo, che saranno citate più avanti, si trovano invece nell'infrarosso vicino e medio e hanno importanti implicazioni nel monitoraggio dello stato di salute della vegetazione.

La radiazione emessa dalla Terra viene registrata da sensori cosiddetti *termici*, le cui finestre di osservazione si trovano fra 3 e 5 μm e fra 8 e 14 μm .

I sensori *multispettrali* registrano la radiazione attraverso molti intervalli, per lo più stretti, di lunghezze d'onda. Questi intervalli, che prendono il nome di *bande*, sono localizzati in vari punti dello spettro, dal visibile all'infrarosso termico.

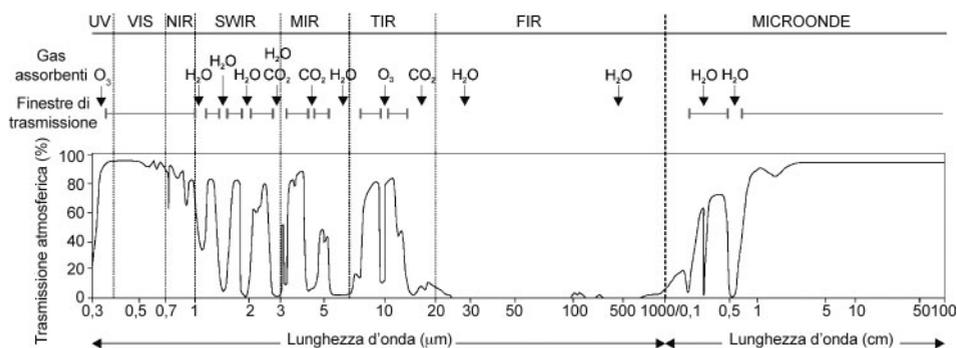


Figura 1.4. Trasmittanza atmosferica e finestre di assorbimento dovute ai diversi gas

La considerazione che deriva dall'analisi della figura 1.4 è che esiste una stretta interdipendenza fra le sorgenti primarie di energia, le finestre atmosferiche attraverso le quali l'energia può essere trasmessa e la sensibilità spettrale del sensore utilizzato per registrare la radiazione.

In sostanza, la scelta del sensore e delle bande spettrali da usare per i diversi scopi è condizionata dalla loro capacità di registrare la radiazione nelle finestre atmosferiche e dalla magnitudine e composizione spettrale dell'energia disponibile in quelle finestre.

Come si avrà modo di trattare nel prossimo capitolo, i sensori per il telerilevamento sono realizzati in modo tale che le loro bande spettrali siano posizionate in maniera efficace rispetto alle finestre atmosferiche, così da poter registrare la radiazione nelle zone di maggior trasmissività.

La scelta di un sensore rispetto a un altro dipende soprattutto dal numero delle bande e dal loro posizionamento rispetto allo spettro elettromagnetico, poiché è il modo in cui l'energia interagisce con gli elementi sotto osservazione (la superficie terrestre) che porta a utilizzare una banda spettrale piuttosto che un'altra per l'interpretazione. Di questo ci si occuperà nel prossimo paragrafo.

1.7. L'interazione della radiazione con la superficie terrestre

Quando la radiazione elettromagnetica incide su una qualunque superficie, si verificano tre fondamentali fenomeni (figura 1.5):

- la *riflessione*;
- l'*assorbimento*;
- la *trasmissione*.

Normalmente i tre fenomeni si realizzano in proporzioni relativamente diverse a seconda delle caratteristiche della superficie e della radiazione.

Dato che l'energia non si crea né si distrugge, per il principio di conservazione, si può scrivere che:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (1.17)$$

dove

Φ_i = flusso di energia radiante incidente

Φ_r = flusso riflesso

Φ_a = flusso assorbito

Φ_t = flusso trasmesso.

Ne consegue che il flusso di energia radiante incidente è uguale alla somma delle tre componenti di flusso: riflessa, assorbita e trasmessa. Normalizzando queste componenti rispetto al flusso incidente, è possibile definire tre grandezze:

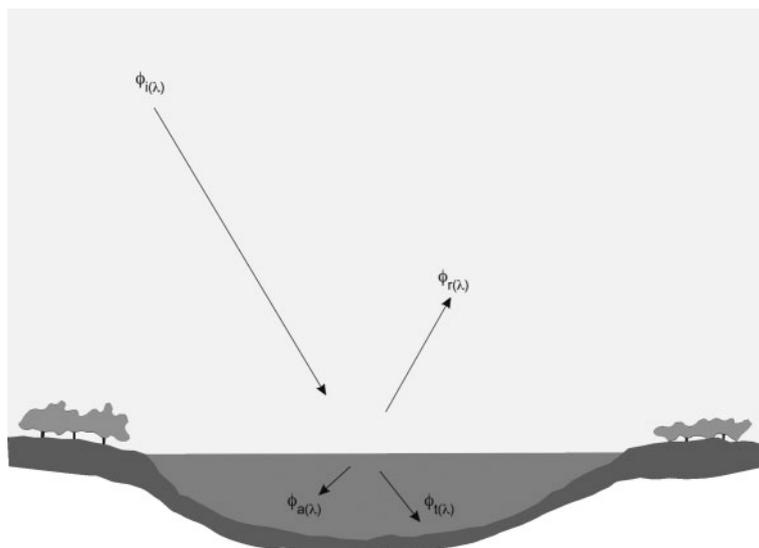


Figura 1.5. Processo di interazione della radiazione em incidente con la superficie terrestre

- il coefficiente di riflessione, chiamato anche *riflettività* $\rho = \Phi_r/\Phi_i$;
- il coefficiente di assorbimento o *assorbività* $\alpha = \Phi_a/\Phi_i$;
- il coefficiente di trasmissione o *trasmittività* $\tau = \Phi_t/\Phi_i$.

La proporzione con cui le tre componenti sopra definite si combinano è strettamente dipendente dalla natura della superficie su cui la radiazione incide. Ad esempio, la riflessione è un fenomeno che dipende dalla natura e dalla scabrosità della superficie: se questa presenta irregolarità di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda della radiazione incidente, essa si comporterà come uno specchio e si avrà una riflessione della radiazione con un angolo uguale a quello di incidenza. Questo tipo di riflessione si chiama *speculare*.

Se, viceversa, le irregolarità hanno dimensioni confrontabili o maggiori della lunghezza d'onda della radiazione incidente, la superficie sarà definita *lambertiana* e la riflessione avverrà in maniera diffusa, più o meno uniformemente in tutte le direzioni. In natura, le superfici hanno comportamenti intermedi fra le superfici speculari e quelle lambertiane. La radiazione diffusa è responsabile del colore degli oggetti. È importante sottolineare che le componenti di energia riflessa, assorbita e trasmessa nel momento in cui la radiazione EM incide una superficie sono dipendenti anche dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa. Per questo motivo, la (1.17) può essere scritta in funzione di λ come segue:

$$\Phi_{i(\lambda)} = \Phi_{r(\lambda)} + \Phi_{a(\lambda)} + \Phi_{t(\lambda)} \quad (1.18)$$

Da essa si ricava che i tre coefficienti di riflettività, assorbività e trasmittività variano anch'essi in funzione della lunghezza d'onda e possono quindi essere indicati come $\rho_{(\lambda)}$, $\alpha_{(\lambda)}$ e $\tau_{(\lambda)}$.

In particolare, di questi tre coefficienti, assume particolare importanza la riflettività, poiché i sensori di telerilevamento per l'osservazione della Terra rilevano principalmente la radiazione riflessa dalla superficie di quest'ultima. Quando viene considerata in funzione della lunghezza d'onda, $\rho_{(\lambda)}$ viene definita *riflettività spettrale* ($\rho_{(\lambda)} = \Phi_{r(\lambda)}/\Phi_{i(\lambda)}$) e, se espressa in percentuale, prende il nome di *riflettanza spettrale*. L'andamento spettrale della riflettività varia a seconda del tipo di superficie su cui incide la radiazione EM e anzi caratterizza in maniera distintiva il tipo di superficie. Per questo motivo esso viene anche chiamato *firma spettrale*. Il prossimo paragrafo tratterà in maggior dettaglio proprio questo argomento.

1.8. Le firme spettrali

La percentuale del flusso di energia radiante incidente su un corpo che viene riflessa, per una data lunghezza d'onda, definita nel paragrafo precedente *riflettanza spettrale*, è funzione delle caratteristiche geometriche, della natura e della composizione del corpo stesso. Ad esempio, il contenuto d'acqua di un suolo o il contenuto di clorofilla della vegetazione sono fattori che influiscono fortemente sulla riflettanza. L'acqua infatti tende in generale ad abbassare la riflettanza di tutti quei corpi che la contengono, mentre la presenza di clorofilla determina un assorbimento della radiazione nell'intervallo spettrale del rosso e una forte riflessione in quello dell'infrarosso vicino.

In sostanza, è possibile analizzare il valore della riflettanza spettrale di un corpo in relazione alle varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Questa analisi porta a realizzare una curva in uno spazio bidimensionale, dove sull'asse delle ordinate è rappresentata la riflettanza e su quello delle ascisse la lunghezza d'onda.

Una curva così costruita è detta *firma spettrale* in quanto caratteristica distintiva, come la firma di una persona, della risposta di un particolare corpo alla radiazione incidente lungo tutto lo spettro elettromagnetico. La figura 1.6 mostra alcune tipiche firme spettrali di oggetti come la vegetazione, l'acqua e il suolo. È possibile tracciare virtualmente la firma spettrale di qualunque materiale: rocce, minerali, diversi tipi di vegetazione in diversi stati evolutivi o di salute, ecc.

La firma spettrale dei diversi tipi di elementi osservabili sulla superficie terrestre costituisce un utile strumento per sapere quali finestre o bande spettrali scegliere per riconoscerli nelle immagini e per differenziarli da altri elementi. Considerando ancora la figura 1.6, si può notare che la vegetazione (qui rappresentata da boschi di conifere e latifoglie) assume valori particolarmente alti nella zona spettrale corrispondente a circa $0,8 \mu\text{m}$, corrispondente all'infrarosso vicino; infatti, è proprio in questa regione che le piante, in virtù del processo di fotosintesi clorofilliana, hanno la loro massima riflettanza. Un altro picco di riflettanza un po' più basso dovuto a tale attività è nel visibile, nella regione del verde (circa

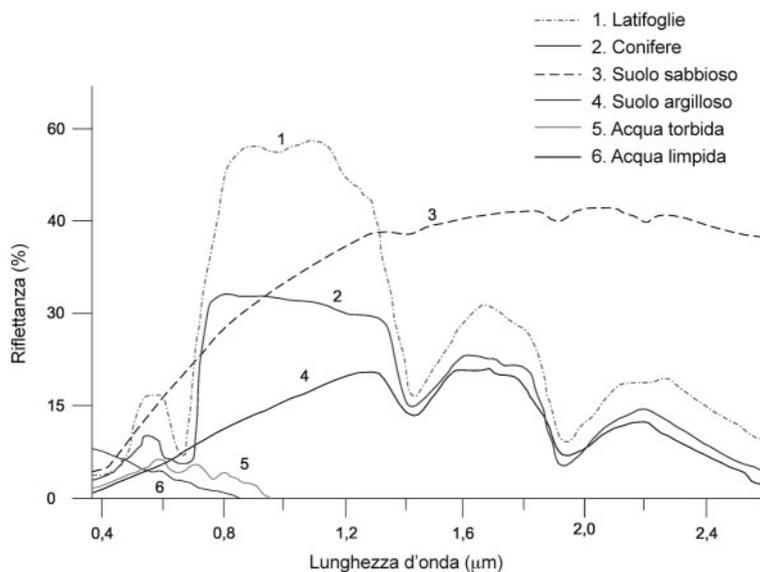


Figura 1.6. Firme spettrali di alcune tipiche superfici

0,55 μm) ed è per questo che l'uomo percepisce la vegetazione di colore verde, non essendo capace di "vedere" nell'infrarosso. Il suolo, invece, tende ad avere i valori massimi intorno a 1,7 μm , nella regione dell'infrarosso medio. L'acqua ha massima riflettanza nel visibile nella regione del blu e poi va a scendere fino ad avere valori di ρ pari a zero quando si entra nell'infrarosso vicino. Per questo motivo, se si osserva uno specchio d'acqua (specialmente se profondo) nell'infrarosso, lo si vede nero.

Prendendo in considerazione le relazioni reciproche fra le varie superfici, se si volesse discriminare la vegetazione dal suolo nudo, si dovrebbe identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra i due elementi è massima. Questa regione, dall'analisi della figura 1.6, risulta essere quella intorno a 0,8 micrometri, proprio dove la vegetazione ha il suo massimo. In questa regione sarebbe invece più difficile discriminare la neve dalla vegetazione, in quanto la prima ha una riflettanza altissima in tutto il visibile e nell'infrarosso vicino, per poi calare bruscamente intorno a 1,4 μm . Una qualunque banda spettrale nel visibile o nell'infrarosso vicino ci permetterebbe quindi di separare meglio le due diverse superfici.

Più difficile può risultare la separazione fra tipi diversi di suolo o di vegetazione. In entrambi i casi si tratta di identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra gli elementi a confronto è massima. Un caso tipico è quello della separazione fra boschi di conifere e boschi di latifoglie. L'andamento delle due curve nel visibile è molto vicino, rendendo la discriminazione alquanto difficile. Appena si entra nell'infrarosso vicino, le curve si separano piuttosto nettamente:

le conifere restano su valori di riflettanza bassi (30%), mentre le latifoglie salgono al 50% e oltre. Questa differenza è dovuta proprio alle caratteristiche intrinseche delle foglie dei due tipi di albero. Una conifera è dotata di foglie aghiformi dalla superficie molto ridotta, mentre le latifoglie, come dice il nome stesso, hanno foglie dalla superficie ampia. La radiazione incidente sulla superficie fogliare sarà maggiormente riflessa se l'area della foglia è più ampia: ne consegue che le latifoglie tendono a riflettere la radiazione più delle conifere. In un'immagine telerilevata in cui la riflettanza è rappresentata con una scala di grigio, dal nero (minima riflettanza) al bianco (massima riflettanza), nella regione dell'infrarosso vicino i boschi di latifoglie appariranno più chiari e quelli di conifere più scuri. Un'altra caratteristica importante della vegetazione è il suo contenuto d'acqua, che rappresenta, tra l'altro, un indice di salute delle piante. Lungo lo spettro elettromagnetico, a lunghezze d'onda pari a 1,4, 1,9 e 2,7 μm , la presenza d'acqua determina un forte assorbimento della radiazione. Qualunque oggetto la contenga tenderà quindi ad avere una bassa riflettanza in questa regione spettrale. Di contro, l'assenza d'acqua determinerà un'alta riflettanza. In base a ciò, osservando la vegetazione in queste bande spettrali, sarà possibile avere un'idea del suo stato di stress idrico, ottenendo utili indicazioni nelle applicazioni forestali e agronomiche del telerilevamento.

Sempre a proposito di acqua, si è osservato che, entrando nella regione dell'infrarosso vicino, la riflettanza dell'acqua tende praticamente a zero: ciò risulta vero per acqua limpida e profonda. Esistono tuttavia due casi in cui, in questa regione spettrale, l'acqua non risulta nera (riflettanza uguale a zero): fondale basso e presenza di sedimenti in sospensione. Se l'acqua è poco profonda, la radiazione nell'infrarosso, grazie al suo ridotto potere penetrativo, riesce ad andare a colpire il materiale che compone il fondale, venendo poi parzialmente riflessa. Se l'acqua contiene particelle in sospensione (tipicamente materiale sedimentario come sabbie e limi), quindi è torbida, saranno loro stesse a riflettere la radiazione infrarossa. Se l'acqua in una immagine ripresa nell'infrarosso vicino non risulta nera, è pertanto possibile che si tratti di uno di questi due casi. Comunemente, l'acqua non risulta nera lungo le coste basse o in laghi poco profondi oppure, per il secondo motivo, alla foce dei fiumi o lungo il corso degli stessi.

Alla luce di tali riflessioni appare chiaro che capire e conoscere le firme spettrali è un passaggio fondamentale nel telerilevamento e nella fotointerpretazione. Solo una volta compreso come i differenti elementi presenti sulla superficie terrestre, quali rocce, suoli, vegetazione, corpi idrici, ecc., interagiscono con la radiazione elettromagnetica, si è in grado di leggere e interpretare correttamente le immagini prodotte dai sensori.