

2. IL TELERILEVAMENTO

Il termine telerilevamento indica quell'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono di estendere e migliorare le capacità percettive dell'occhio, fornendo all'osservatore informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza. Il telerilevamento opera attraverso sensori che captano la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie terrestre e la convertono in segnali interpretabili. L'energia elettromagnetica raccolta dai sensori forma un'immagine i cui elementi (*pixel*) sono caratterizzati da valori discreti.

L'uso del telerilevamento appare il miglior metodo per monitorare i sistemi a marea, poiché questi sono sede di fenomeni variabili sia dal punto di vista spaziale (con scale che vanno dall'ordine del decimetro a quello del chilometro), che da quello temporale (tempi che vanno da quelli mareali fino a quelli annuali ed oltre). L'impiego di sensori remoti consente di esaminare la riflettanza della vegetazione presente sulle *barene*, permettendo la più opportuna sinotticità delle osservazioni, la non compromissione del fenomeno osservato e, soprattutto, la ripetibilità dell'analisi, indispensabile per riuscire a comprendere fenomeni di tipo evolutivo. In contrapposizione l'analisi diretta sul campo delle specie vegetali e della loro distribuzione risulterebbe troppo gravosa per l'estensione dell'area di studio e per le difficoltà di accesso.

Il remote sensing permette inoltre il riconoscimento delle varie specie vegetali presenti sulla *barena*, sfruttando la diversità delle loro firme spettrali che sono caratteristiche di ciascuna specie alofila.

2.1 L'energia solare

Le reazioni che avvengono all'interno del sole producono, in accordo con la legge del corpo nero di Planck, uno spettro complesso di energia elettromagnetica, che giunge sulla terra attenuato da fenomeni di riflessione, diffusione ed assorbimento dovuti all'atmosfera.

2.1.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è la distribuzione dell'energia elettromagnetica, ordinata per lunghezze d'onda λ crescenti. Per convenzione lo spettro è stato suddiviso in regioni, o *bande*, nell'intervallo $10^{-6} \div 10^9 \mu\text{m}$. Nella tabella 2.1 e in figura 2.2 sono elencate le regioni dello spettro e le corrispondenti lunghezze d'onda.

Tab 2.1 DIVISIONE PRINCIPALE DELLO SPETTO ELETTRROMAGNETICO

REGIONE DELLO SPETTRO	LIMITI
Raggi gamma	< 0.03 nm
Raggi x	0.03 ÷ 290 nm
Ultravioletto (UV)	0.29 ÷ 0.40 μm
UVB	0.29 ÷ 0.32 μm
UVA	0.32 ÷ 0.40 μm
Visibile	0.40 ÷ 0.72 μm
Radiazione infrarossa	
Vicino infrarosso	0.72 ÷ 1.30 μm
Medio infrarosso	1.30 ÷ 3.00 μm
Lontano infrarosso	3.00 ÷ 1000 μm (1mm)
Microonde	1mm ÷ 30cm
Onde radio	≥ 30 cm

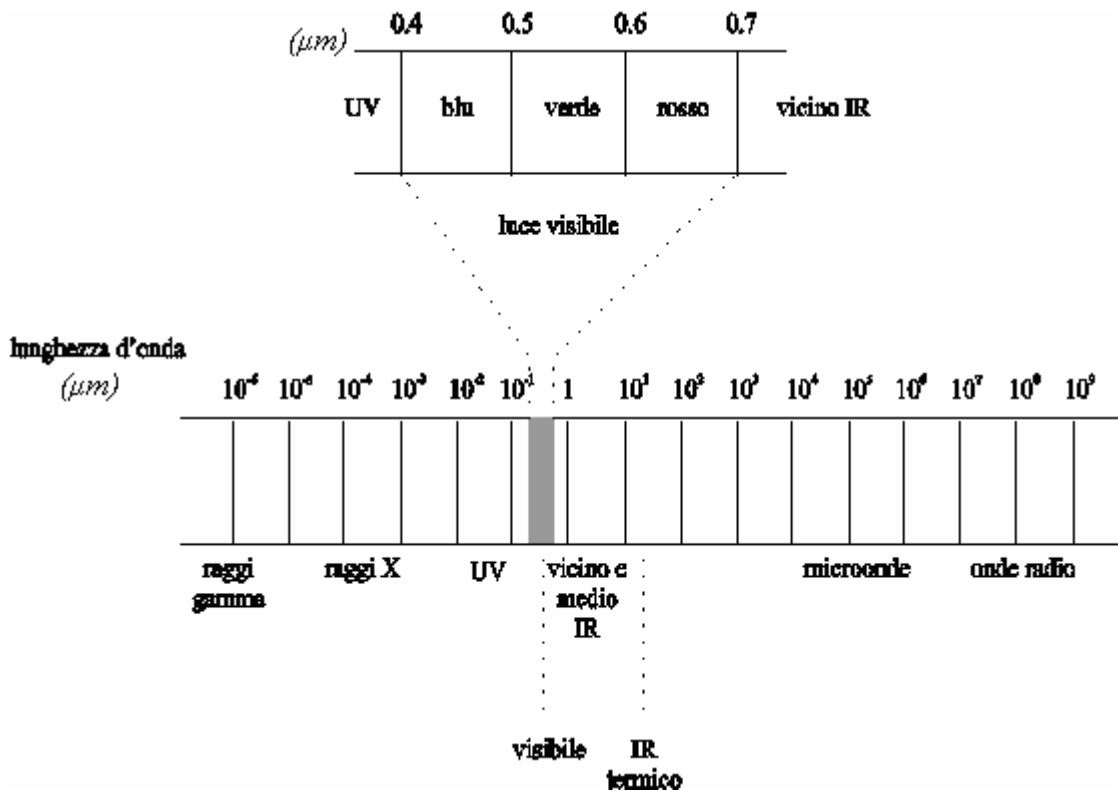


Figura 2.2 - Spettro elettromagnetico

Lo *spettro di riflessione* è compreso nell'intervallo $0.38 \div 3.00 \mu\text{m}$ e include quella radiazione che può essere riflessa con lenti o specchi e riguarda la parte di spettro solare usata nelle misure spettrali.

La *radiazione ultravioletta* è in gran parte diffusa dall'atmosfera, perciò non viene molto utilizzata nel remote sensing, mentre lo *spettro visibile* è definito dai limiti di sensibilità dell'occhio umano ed è ad esempio usato nelle tecniche fotografiche.

La *radiazione infrarossa* (IR) si divide in:

- vicino e medio IR: è essenzialmente la radiazione riflessa dalla terra;
- lontano IR: comprende la radiazione emessa dalla terra (viene chiamata anche energia termica).

2.2 Interazioni con l'atmosfera e con la superficie terrestre

Prima di raggiungere la superficie terrestre la radiazione solare attraversa l'atmosfera: in questo passaggio una parte dell'energia è riflessa verso l'alto; un'altra parte viene invece assorbita e poi riemessa in tutte le direzioni come radiazione termica; una parte viene diffusa. L'energia elettromagnetica riflessa e parte di quella diffusa trasportano le informazioni registrate dai radiometri e dai sensori utilizzati nel telerilevamento.

Le interazioni atmosferiche della radiazione elettromagnetica possono essere rilevanti o trascurabili ai fini dei rilievi spettrali a seconda del percorso che l'onda deve compiere prima di essere catturata dal sensore. Maggiore è tale percorso, maggiori sono le influenze atmosferiche sulla radianza registrata dal sensore: se il sensore è montato su un aereo che vola a bassa quota, o se le misure sono fatte a terra, gli effetti dell'atmosfera nella radiazione riflessa sono trascurabili; al contrario i sensori montati su satellite ne sono molto influenzati, perché la radiazione riflessa deve attraversarla completamente prima di raggiungerli.

L'atmosfera modifica la radiazione utile al telerilevamento principalmente in tre modi: **diffusione** (*scattering*), **assorbimento atmosferico** e **rifrazione**. La radiazione elettromagnetica che raggiunge la superficie terrestre interagisce con essa attraverso processi di **riflessione**, **trasmissione** e **assorbimento terrestre** (vedi figura 2.3).

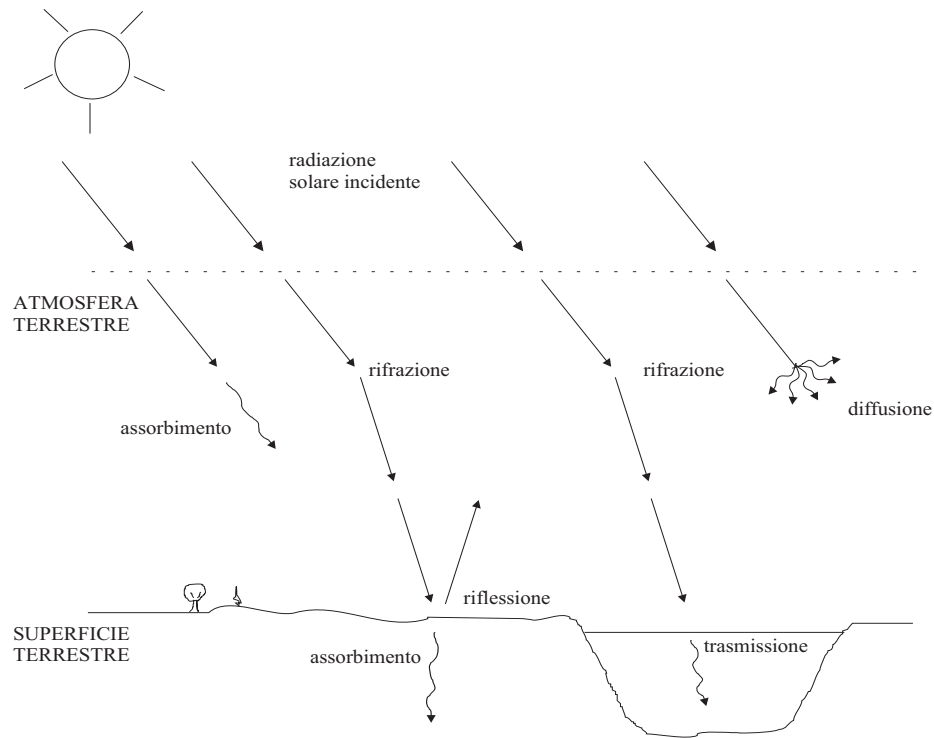


Figura 2.3 Interazioni raggio luminoso- atmosfera e raggio luminoso-superficie

Diffusione: si verifica per interazione con le particelle fini o gassose dell'atmosfera e distribuisce in tutte le direzioni la radiazione intercettata. Un'onda interagisce con un oggetto quando la sua lunghezza d'onda è paragonabile con le dimensioni caratteristiche del corpo in esame. L'atmosfera è costituita in prevalenza da gas con dimensioni molecolari molto ridotte: la diffusione avviene prevalentemente per le radiazioni a lunghezza d'onda più bassa, vale a dire per quelle nel campo del violetto e del blu. Questo spiega ad esempio il colore del cielo durante il giorno: quando il sole è alto all'orizzonte, il percorso che i raggi solari devono compiere per arrivare ad un osservatore è breve, per cui si vedrà la diffusione prevalentemente del blu. Quando il sole è al tramonto, si colora di rosso perché, essendo basso sull'orizzonte, il percorso che i raggi devono compiere è lungo e quindi riusciranno a passare e ad essere visibili solo quelle radiazioni influenzate debolmente dalla diffusione, quelle cioè relative al rosso.

Rifrazione: avviene quando il raggio di luce attraversa due mezzi differenti in grado di trasmettere la radiazione: il raggio luminoso viene curvato secondo la legge di Snell dell'ottica che lega gli angoli d'incidenza (α_1) e di rifrazione (α_2) con gli indici di rifrazione, secondo la formula:

$$\frac{\text{sen}\alpha_1}{\text{sen}\alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

Nell'atmosfera questo fenomeno avviene al passaggio dei diversi strati atmosferici caratterizzati da umidità e temperature differenti. Tali variazioni influenzano la densità degli strati atmosferici causando una curvatura del raggio che li attraversa. Questo fenomeno è osservabile in estate durante le giornate molto calde, in cui si osserva un "tremolio" di oggetti posti in lontananza, dovuto al passaggio della luce vicino a superfici molto calde, come ad esempio il manto stradale.

Assorbimento atmosferico: si verifica per interazione della radiazione elettromagnetica con i gas presenti nell'atmosfera; i principali agenti sono: ozono, ossigeno, anidride carbonica e vapor acqueo. Questi gas assorbono l'energia contenuta nella radiazione luminosa per poi riemetterla sotto forma di energia radiante con lunghezza d'onda maggiore. L'assorbimento da parte dei gas si verifica quando una radiazione con lunghezza d'onda di dimensioni paragonabili a quelle delle molecole gassose, entra in contatto con esse, così che l'energia trasportata dall'onda si trasforma in energia vibrazionale o rotazionale dei legami atomici. L'atmosfera terrestre non è quindi completamente trasparente alla radiazione elettromagnetica, poiché questi gas fungono da barriera selettiva nei confronti della lunghezza d'onda incidente.

Riflessione: avviene quando un raggio luminoso incide su una superficie non trasparente e viene diretto in un'altra direzione. Il tipo di riflessione dipende dalle dimensioni delle irregolarità della superficie: se essa è liscia in relazione alla lunghezza d'onda, si verifica il fenomeno della riflessione speculare, in cui tutta la radiazione incidente viene riflessa in un'unica direzione. Se la superficie è invece irregolare si comporta come un riflettore isotropo (o diffuso) e la luce viene riflessa in modo diffuso: nel caso ideale segue la legge di Lambert (formula 2.2) secondo la quale la luce viene riflessa in tutte le direzioni con intensità che decresce secondo il coseno a partire dalla normale alla superficie, e questo in modo indipendente dall'angolo di incidenza del raggio incidente:

$$I(\alpha) = I_0 * \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

dove I_0 è l'intensità della luce diffusa in direzione perpendicolare alla superficie riflettente.

Trasmissione: avviene quando la radiazione passa attraverso un mezzo senza subire una significativa attenuazione. La trasmissione dipende dalla lunghezza d'onda: esistono corpi opachi in alcune lunghezze d'onda e trasparenti per altre.

Assorbimento terrestre: la superficie terrestre può assorbire la radiazione elettromagnetica a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche dei corpi che vi si trovano. Ad esempio la vegetazione assorbe gran parte della radiazione incidente nella banda del rosso, per poi riemetterla sotto forma di energia termica a lunghezza d'onda maggiore. In natura ogni oggetto ha un rapporto ben preciso tra radiazione emessa, riflessa o assorbita. Tale rapporto costituisce la *firma spettrale* di ogni corpo, e permette di ottenere informazioni sulle caratteristiche delle superfici analizzate.

Queste caratteristiche atmosferiche devono essere considerate nell'acquisizione dei dati rilevati da satellite o da aereo (esistono modelli di correzione atmosferica che possono essere utilizzati per depurare i dati telerilevati dagli effetti atmosferici), ma sono trascurabili per rilievi effettuati da terra.

2.3 Il concetto di risoluzione

2.3.1 Risoluzione geometrica

Ogni sensore è caratterizzato da una risoluzione geometrica, che identifica l'area di suolo le cui dimensioni sono legate a quelle del pixel sull'immagine digitale e alla distanza fra lo strumento e l'oggetto. In ogni istante il sensore rileva l'energia proveniente da un'area ben precisa all'interno dell'angolo solido sotteso, e registra il valore per ogni unità elementare dell'immagine. Tale unità di superficie al suolo viene definita IFOV (*Instantaneous field of view*) e rappresenta l'area al suolo sottesa alla proiezione di un elemento del detector, ingrandita secondo il rapporto tra altezza H a cui è posto il sensore e la distanza focale f del sistema ottico impiegato (vedi figura 2.4).

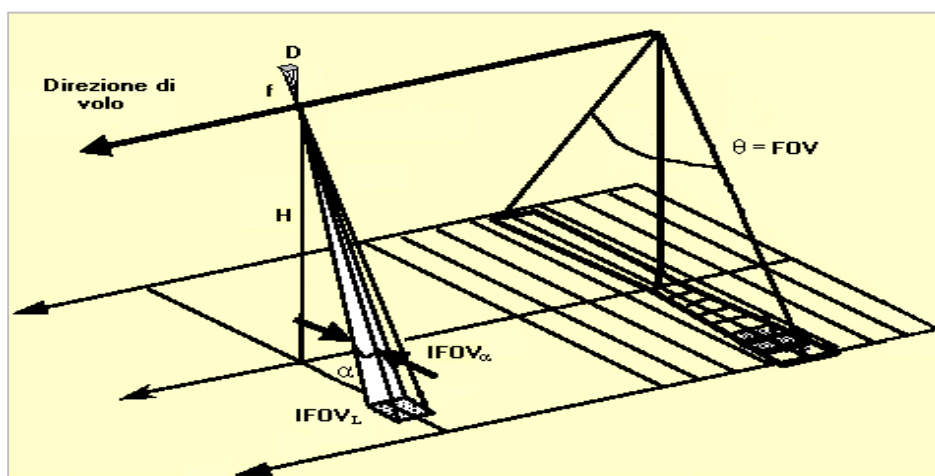


Figura 2.4 - Caratteristiche geometriche delle "strisciate" digitali ottenute con sensori scanner

Il valore di IFOV dipende dalle caratteristiche strumentali, e può essere espresso come angolo o direttamente come lunghezza :

$$\text{in radianti: } \text{IFOV}_\alpha = D/f$$

$$\text{in metri: } \text{IFOV}_L = HD/f$$

dove α rappresenta l'angolo sotteso, L esprime la dimensione del lato del pixel al suolo e D l'apertura del detector.

L'apertura angolare complessiva entro la quale il sensore capta il segnale è il campo di vista (*field of view*, FOV), che rappresenta la massima ampiezza dell'area indagata nella direzione perpendicolare alla rotta di volo.

Per ottenere un'alta risoluzione spaziale sono desiderabili piccoli IFOV, tuttavia esiste un limite a questo assunto: l'energia acquisita dal sensore, provenendo da una superficie al suolo piccola, induce ad una ridotta capacità del sensore a rilevare un segnale ben distinto dal rumore di fondo.

2.3.2 Risoluzione radiometrica

La risoluzione radiometrica è la capacità del sensore di registrare valori diversi di radianza nella fase di raccolta dei dati. Il segnale inviato dal detector deriva dalla trasformazione di un segnale ottico analogico in un segnale elettrico digitale, che associa un numero binario ad un livello (tono) di grigio. Per esempio se un'immagine è acquisita con 8 bit di memoria, la risoluzione radiometrica assocerà 2^8 (256) toni di grigio all'immagine stessa: in questo modo risoluzioni ottiche maggiori produrranno un maggiore numero di toni di grigio per rappresentare i dati acquisiti dal sensore.

I sistemi di rilevamento sono progettati in modo da registrare il maggior numero possibile di livelli di segnale per ridurre al minimo la perdita di informazione dell'area osservata; il rapporto segnale/rumore limita la risoluzione radiometrica dei dati raccolti, cioè la capacità del sistema di individuare piccole variazioni di radianza.

2.3.3 Risoluzione spettrale

La risoluzione spettrale di un sistema per il telerilevamento è determinata dall'ampiezza della banda (intervallo di lunghezza d'onda) dei canali impiegati. Esistono due tipi fondamentali di sensori: i multispettrali, che acquisiscono l'immagine in un numero limitato di bande spettrali distinte, ampie e non sempre contigue, e gli iperspettrali, che registrano il segnale in numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati. Il livello di dettaglio della risposta

spettrale dei bersagli presenti al suolo dipende dalla risoluzione spettrale, la quale richiede una configurazione strumentale a bande molto strette per raggiungere buoni livelli. Un limite dei sistemi ad alta risoluzione è che generalmente soffrono di bassi valori di rapporto segnale/disturbo, in quanto la potenza raccolta dal sensore, a parità di radianza al suolo, è proporzionale all'ampiezza dall'intervallo delle lunghezze d'onda in cui il segnale viene registrato (Brivio et al., 1992); il problema può essere in parte superato se si ricorre a riprese di durata relativamente elevata.

Per lo studio della vegetazione risulta più interessante utilizzare la parte dello spettro elettromagnetico compresa tra il visibile ed il vicino infrarosso, poiché la risposta spettrale delle specie vegetali mostra un tipico picco di riflettanza nel verde, un ripido margine verso l'infrarosso, ed un picco di assorbimento della clorofilla nel blu e nel rosso.

2.3.4 Risoluzione temporale

Una delle caratteristiche più interessanti del telerilevamento è la possibilità di studiare l'evoluzione di un fenomeno mediante rilevamenti successivi nel tempo.

Lo studio di ambienti dinamici, come quelli a marea, richiede che il tempo impiegato per raccogliere i dati in tutto il territorio considerato sia molto breve, nell'ordine delle decine di minuti, per eliminare gli effetti dovuti all'escursione di marea. Se così non fosse la risposta del sensore sarebbe influenzata dalla variabilità temporale delle condizioni di umidità del suolo; per questo motivo bisogna fare molta attenzione nell'acquisizione dei dati attraverso sensori aerotrasportati, i quali registrano le informazioni necessarie con un tempo non sempre adeguato alle esigenze.

2.4 I sensori utilizzati

I sensori utilizzati per l'acquisizione delle immagini sono il sensore satellitare QuickBird, che opera ad una distanza di 450 km, due sensori iperspettrali passivi¹, il MIVIS ed il CASI, aerotrasportati a circa 900 m di quota, e un sensore attivo², il LIDAR della Toposys, aerotrasportato a quote variabili tra 500÷1000 m. Questa scelta è stata fatta in base alle caratteristiche spettrali e alle scale di variabilità temporale e spaziale del bersaglio da indagare.

Oltre l'uso delle immagini telerilevate per questo studio è stata necessaria anche l'acquisizione di dati attraverso il radiometro portatile GER 1500, che permette la misurazione diretta di valori di radianza della vegetazione presente in *barena*. I risultati ottenuti con queste misure permetteranno, successivamente, il confronto con quelli ricavati dalle registrazioni satellitari, operazione necessaria per la taratura del sensore posto sul satellite.

¹ **Sensore passivo:** registra la radianza come energia elettromagnetica riflessa dai corpi presenti nella scena.

² **Sensore attivo:** registra l'energia riflessa dalla scena producendo in maniera autonoma l'energia incidente.

2.4.1 Il radiometro portatile GER 1500

Lo strumento utilizzato nei rilievi a terra è il GER 1500, un sensore passivo che copre l'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350÷1050 nm, in corrispondenza alle bande dell'ultravioletto, del visibile e del vicino infrarosso, nelle quali le proprietà riflesse degli oggetti sono più evidenti. Il segnale acquisito non è continuo, ma discretizzato in 512 canali le cui frequenze distano circa 1.5 nm l'una dall'altra. L'angolo di apertura del sensore (FOV) è di 4°, per cui, ad una distanza di un metro, il cerchio inquadrato ha un diametro di circa 7 cm.

Nell'analisi delle risposte spettrali della vegetazione, si osserva come la vegetazione verde abbia una caratteristica interazione con le onde elettromagnetiche nel visibile e nelle regioni del vicino-infrarosso. La clorofilla è responsabile di un elevato assorbimento nel rosso, mentre l'acqua contenuta negli spazi intracellulari delle foglie assorbe molta dell'energia con lunghezze d'onda maggiori di 1400 nm, e riflette quella caratteristica dell'infrarosso: questo assorbimento preferenziale produce il caratteristico colore verde delle foglie.

2.4.2 Il QuickBird

Il QuickBird è il satellite a più alta risoluzione spaziale e minor prezzo fra quelli (QuickBird e IKONOS) attualmente attivi per usi commerciali: il 18 dicembre 2001 la Digital Globe ha provveduto con successo al suo lancio, consentendo il monitoraggio della superficie terrestre.

Le immagini utilizzate in questo lavoro sono state acquisite in data 10 febbraio e 25 luglio 2003 per conto dell'unità TIDE³, che opera presso il Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università di Ca' Foscari di Venezia; esse sono state fornite dalla società Telespazio, concessionaria dei prodotti Digital Globe in Italia.

Il sensore è in grado di suddividere il territorio osservato in scene di larghezza massima di 16.5 km, che vengono acquisite in circa quattro secondi, rendendo trascurabili le variabilità temporali degli ambienti di marea; la sua risoluzione geometrica raggiunge valori pari a 70 cm nel pancromatico e 2.8 m nel multispettrale. Esso risulta quindi indicato sia per l'individuazione delle principali strutture morfologiche del territorio (*ghebi, velme e chiari*), sia per il riconoscimento delle macchie di vegetazione di *barena*.

³ Il progetto TIDE ha programmato regolari sorvoli dell'area lagunare ogni tre mesi per monitorare lo sviluppo della vegetazione e l'evoluzione morfologica su ampia scala temporale. Il QuickBird sorvola la terra a 450 km di distanza, percorrendo un'orbita eliosincrona di 98° che garantisce un sorvolo della stessa zona ad intervalli regolari 1.5 ÷ 4 giorni in base alla latitudine dell'area selezionata durante tutto l'anno.

Il QuickBird ha reso possibile l'acquisizione di due differenti tipi di immagini, entrambe in modalità 16-bit, ovvero l'intensità dell'energia in arrivo al sensore è suddivisa in intervalli di luminosità discreti che vengono convertiti in 2^{16} livelli di grigio: la prima in modalità multispettrale permette di registrare quattro bande, in parte sovrapposte, nei canali del blue, del verde, nel rosso e dell'infrarosso vicino (NIR); la seconda immagine registra il segnale in modalità pancromatica (un'unica banda ampia 450 nm), riducendo la risoluzione spettrale, ma aumentando quella spaziale.

Tab 2.2 INTERVALLI SPETTRALI DELLE BANDE QUICKBIRD

BANDA	Lim. Inf.(nm)	Lim.Sup.(nm)	Ampiezza(nm)
Pancromatico	450	900	450
Blu	450	520	70
Verde	520	600	80
Rosso	630	690	60
NIR	760	900	140