

C.N. BIANCHI<sup>1</sup>, G.D. ARDIZZONE<sup>2</sup>, A. BELLUSCIO<sup>2</sup>, P. COLANTONI<sup>3</sup>, G. DIVIACCO<sup>4</sup>,  
C. MORRI<sup>1</sup>, L. TUNESI<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse, Università di Genova,  
Corso Europa, 26 - 16132, Genova, Italia.

<sup>2</sup> Dipartimento di Biologia Animale e dell'Uomo, Università di Roma "La Sapienza",  
Viale Università, 32 - 00185 Roma, Italia.

<sup>3</sup> Istituto di Geodinamica e Sedimentologia, Università di Urbino, Campus Scientifico (Sogesta),  
Località Crocicchia - 61029, Urbino, Italia.

<sup>4</sup> Ufficio Parchi e Aree Protette, Regione Liguria - Via Fieschi, 15 - 16100 Genova, Italia.

<sup>5</sup> ICRAM, Via di Casalotti, 300 - 00166 Roma, Italia.

## CAPITOLO 11

### LA CARTOGRAFIA DEL BENTHOS

#### Indice

- 11.1 Introduzione
- 11.2 Cenni storici
- 11.3 Programmazione
- 11.4 Richiami di cartografia di base
  - 11.4.1 Le proiezioni
  - 11.4.2 Le coordinate
  - 11.4.3 Le carte di uso comune
- 11.5 Posizionamento
- 11.6 Rilevamento
  - 11.6.1 Telerilevamento
    - 11.6.1.1 Tecniche satellitari
    - 11.6.1.2 Foto aerea
  - 11.6.2 Metodi ecografici
  - 11.6.3 Sistemi video controllati a distanza
  - 11.6.4 Rilevamenti subacquei
  - 11.6.5 Campionamenti puntiformi
  - 11.6.6 Integrazione tra metodi diversi
- 11.7 Restituzione
  - 11.7.1 Scala
  - 11.7.2 Tipologia delle legende
    - 11.7.2.1 Unità di popolamento
    - 11.7.2.2 Specie significative
    - 11.7.2.3 Dinamica
- 11.8 Sistemi Informativi Geografici (GIS)
- 11.9 Bibliografia

#### 11.1 Introduzione

La cartografia tematica è la rappresentazione del posizionamento di elementi (temi) in uno spazio georeferenziato. La cartografia ambientale riveste un ruolo di primaria importanza sia per gli aspetti di ricerca di base legati alla conoscenza degli ecosistemi, sia per gli aspetti finalizzati, legati a necessità di intervento e gestione del territorio (Bartlett, 2000; Villa *et al.*, 2002). Per questi motivi, la cartografia ecologica è già fortemente sviluppata in ambiente terrestre, dove la mappatura della vegetazione

o delle caratteristiche mesologiche e pedologiche costituisce ormai un elemento fondamentale nell'ambito degli studi ambientali.

Simili motivazioni sono alla base anche delle carte ecologiche in ambiente marino. Il loro interesse è del tutto analogo a quello delle carte terrestri, ma ciò nonostante le loro realizzazioni sono di gran lunga meno frequenti, sia a causa di una minor tradizione a considerare il mare come "territorio" sia per le ovvie difficoltà operative. Ciò non toglie che esista una tradizione importante di cartografia ecologica in Mediterraneo, soprattutto per opera della scuola francese (Molinier e Picard, 1960; Meinesz, 1985).

Molti di questi studi sono in realtà strettamente monotematici, e si rivolgono ad esempio alla mappatura della sola vegetazione sommersa, segnatamente le praterie di *Posidonia oceanica*: uno dei primi studi su questo tema è quello di Colantoni *et al.* (1982).

Recentemente, lo strumento cartografico è stato utilizzato anche per cartografare risorse ittiche demersali (Corsi *et al.*, 1998; Ardizzone *et al.*, 1999) e come strumento di gestione delle stesse (Ardizzone *et al.*, 2000; Santos, 2000).

Più complete sono invece le cosiddette carte bionomiche, che prendono in considerazione l'insieme dei popolamenti biologici bentici presenti nell'area cartografata. Il benthos è privilegiato per tale tipo di cartografia per la sua maggior strutturazione rispetto all'ambiente pelagico, per la sua relativa stabilità spaziotemporale, e per la sua efficacia nel registrare alterazioni ambientali (Bianchi e Zurlini, 1984).

Nei mari italiani, produzioni cartografiche bionomiche su vaste aree hanno interessato le coste pugliesi (Parenzan, 1983; Bianchi e Morri, 1989), liguri (Bianchi e Peirano, 1995; Tunesi *et al.*, 2002), toscane (Bianchi *et al.*, 1996), laziali (Ardizzone *et al.*, 1996). Esistono inoltre numerose carte non pubblicate, in quanto annesse a perizie tecniche o rapporti riservati (ad es., gli studi per la realizzazione delle Aree Marine Protette). Méaille *et al.* (1988) hanno evidenziato che il confronto tra carte bionomiche rilevate in periodi differenti rappresenta uno strumento potente per riconoscere l'evoluzione temporale e le alterazioni subite dagli ecosistemi di una data regione.

Nei mari italiani, una serie, per quanto frammentaria, di carte bionomiche "storiche" esiste solo per l'Adriatico (Vatova, 1949; Gamulin-Brida, 1967; Orel *et al.*, 1987, Albertelli *et al.*, 1998).

## 11.2 Cenni storici

La prima caratteristica del mare che viene riportata sulle carte nautiche è la profondità. Inizialmente le indicazioni di profondità del fondo marino sono riportate sempre in vicinanza della costa con il preciso scopo di aiutare i marinai durante la navigazione, o durante l'avvicinamento agli approdi, segnalando eventuali secche o scogli pericolosi.

Già nel 1584, nell'atlante marittimo di Lucas Waghenaeer, si trovano le prime indicazioni di profondità. Per trovare altre caratteristiche del mare riportate su carte geografiche bisogna attendere più di un secolo. Nel 1725, L.F. Marsili pubblica la *Carte du Golfe du Lion*, annessa alla sua opera *Histoire physique de la mer*.

Quest'opera può essere considerata l'atto di nascita della moderna oceanografia. Infatti Marsili, convinto che la terra sommersa fosse una continuazione di quella emersa, studia il mare e i suoi fondali, analizzandone morfologia, movimenti (onde,

correnti, maree), flora e fauna. Nelle sue carte del Golfo del Leone, Marsili fece inoltre uso di curve di livello per segnare il passaggio da una profondità all'altra, lungo la piattaforma continentale.

Il primo studioso che fornisce una carta bionomica dei fondali marini mediterranei è il francese Marion (1883). Nel suo lavoro di *Topographie zoologique* del Golfo di Marsiglia si trova una carta in cui vengono riportati i principali popolamenti che caratterizzano i fondali marini. Una recente sinossi sulla rappresentazione cartografica nelle ricerche di biologia marina in Mediterraneo è fornita da Ardizzone (2000).

### 11.3 Programmazione

Il rilevamento per la cartografia necessita di accuratezza nella pianificazione in relazione alla successiva efficacia di rappresentazione delle variabili esaminate.

- A) *Disegno di campionamento*. La scelta della densità di osservazioni oltre che delle modalità di individuazione del sito (*random* semplice o stratificato, disegno sistematico o a *cluster*, ecc.) sono funzione di molti fattori (metodica di campionamento, disponibilità economica, superficie da esplorare e scala di restituzione) che sempre devono essere tenuti in considerazione per ottenere un risultato corretto.
- B) *Posizionamento*. L'individuazione sul campo dei punti in cui effettuare campioni o osservazioni è un altro aspetto cruciale della cartografia. Le recenti evoluzioni tecnologiche consentono ormai buona precisione a basso costo. Altro problema che è spesso presente è la carenza o l'inadeguatezza di carte di base su cui effettuare tanto i posizionamenti quanto le restituzioni. Rilievi su un'area di 100 m<sup>2</sup> eseguiti con la massima accuratezza ma restituiti su una carta 1:200.000 o ancor peggio su un ingrandimento di questa non possono produrre altro che dati grossolani. In alcuni casi è opportuno acquisire batimetrie *ex novo*, con le tecnologie "rapide" di tipo *multi beam* ed alla scala necessaria.
- C) *Rilevamenti*. Esistono numerose metodiche di raccolta dati in relazione alle finalità delle ricerche con applicazioni di tipo cartografico, e per ciascuna è disponibile una articolata letteratura. Ognuna di queste metodiche ha una sua strategia di campionamento e pertanto il disegno di prelievo deve essere calibrato sulla specifica attività prevista.
- D) *Restituzione*. Ogni dato ottenuto dal campionamento necessita di una elaborazione in quanto non è immediatamente restituibile cartograficamente. Le elaborazioni devono frequentemente interpolare i dati osservati generando poligoni. Ogni punto di tali superfici deve essere georeferenziato per ciò che riguarda il suo posizionamento nello spazio e la cartografia di base su cui saranno restituiti i dati dovrà avere sistemi di riferimento (ellissoide, sistema geodetico, proiezione, modalità di misura di latitudine e longitudine) coerenti con il posizionamento dei dati stessi.

Va sottolineato che, in assenza di una corretta impostazione metodologica relativa a ciascuno dei quattro punti sopra citati, i risultati ottenuti non possono essere considerati di tipo "cartografico". Osservando il solo prodotto finale, è spesso difficile tracciare un netto confine tra ciò che è cartografia biologica e ciò che è semplicemente una rappresentazione schematica di un'area all'interno della quale si riporta un tematismo biologico.

## 11.4 Richiami di cartografia di base

### 11.4.1 Le proiezioni

Per poter rappresentare sul piano di una carta la superficie curva della Terra, occorre proiettare su una superficie piana i punti di una figura geometrica alla quale si può assimilare il nostro pianeta, e cioè un'ellissoide di rotazione, per il quale da diversi geodeti sono stati indicati dimensioni e orientamenti spaziali diversi. La più nota proiezione geografica è la proiezione di Mercatore, secondo la quale si immagina di proiettare sulla superficie di involuppo di un cilindro i punti dell'ellissoide, considerando che la tangenza delle due figure geometriche avvenga lungo un parallelo. In questo modo i meridiani e i paralleli vengono rappresentati da segmenti rettilinei e paralleli che si intersecano tra loro secondo angoli retti. I meridiani saranno in questo modo equidistanti, mentre la distanza tra i paralleli dall'equatore varia e viene calcolata con formule matematiche. Il maggior pregio di questa proiezione è quello di mantenere gli angoli costanti in ogni punto (isogonia) e in particolare di conservare lungo la congiungente di due punti un angolo di rotta costante (rettificazione delle lossodromie). Ciò permette di tracciare e di seguire sulla carta delle rotte seguendo le indicazioni di una bussola.

Se la tangenza tra cilindro di proiezione e l'ellissoide di riferimento avviene lungo un meridiano, si ottiene una proiezione cilindrica inversa o di Gauss la cui applicazione al territorio nazionale fu studiata dal topografo italiano Boaga. Da qui la definizione di proiezione cilindrica inversa di Gauss-Boaga.

I principali vantaggi che si ottengono dalla redazione di carte derivanti da questa proiezione sono quelli di poter usare un reticolato cartesiano a maglie chilometriche avente l'asse delle ascisse coincidente con l'equatore e l'asse delle ordinate coincidente con il meridiano di tangenza del cilindro. Man mano che ci si allontana dal meridiano di tangenza, le deformazioni aumentano e per mantenerle entro limiti accettabili, non ci si estende longitudinalmente per un'ampiezza superiore a  $6^\circ$ . In pratica si tratta quindi di una rappresentazione "policilindrica" in cui su ogni cilindro si proietta solo un fuso di ampiezza di  $6^\circ 30'$  (leggermente maggiore rispetto all'ampiezza standard U.T.M.). Avendo l'Italia un'ampiezza di circa  $12^\circ$  in Longitudine, per rappresentarla sono sufficienti due fusi. Essi vengono riferiti al meridiano centrale di Monte Mario e sono chiamati Fuso Est e Fuso Ovest. Il sistema cartesiano di riferimento per il territorio italiano ha dunque l'asse delle ascisse coincidente con l'equatore e l'asse delle ordinate coincidente con il meridiano centrale del fuso ( $9^\circ$  e  $15^\circ$ ). Per evitare valori negativi, all'origine delle ascisse sono stati dati i valori chilometrici di 1500 e di 2520 rispettivamente per il fuso Ovest e per il fuso Est. In questo modo non si hanno valori negativi neanche per punti a sinistra del meridiano di riferimento e tutti i valori di ascissa per il fuso Ovest iniziano con la cifra 1, mentre quelli del fuso Est iniziano con la cifra 2.

L'ellissoide di riferimento è quello Internazionale di Hayford 1909, sostituito dal Roma-Datum nel 1940. Nel 1950 una convenzione internazionale ha deciso di uniformare le cartografie nazionali adottando un sistema universale di rappresentazione detto *Universal Transverse Mercator*, noto con la sigla U.T.M. Si tratta della proiezione policilindrica inversa già detta, comprendente 60 fusi di  $6^\circ$  di Longitudine e 20 fasce tra  $80^\circ$  di Latitudine Nord e  $80^\circ$  di Latitudine Sud, mentre le calotte polari sono rappresentate dalle proiezioni stereografiche polari. I fusi sono numerati da 1 a 60 a partire dall'antimeridiano di Greenwich, mentre le fasce sono identificate da

lettere a partire da sud. L'Italia risulta compresa quasi interamente nelle zone 32/33 T e 32/33 S.

Recenti misurazioni effettuate con i satelliti ed in particolare l'introduzione del sistema di posizionamento satellitare GPS (*Global Positioning System*) ha portato oggi a considerare un nuovo elissoide detto *World Geodetic System* (WGS 84) al quale riferire le coordinate.

Quando si utilizzano coordinate occorre quindi fare molta attenzione al sistema di riferimento e in particolare all'elissoide e alla proiezione, se si vogliono evitare errori anche grossolani. Particolari algoritmi possono comunque permettere le necessarie correzioni per passare da un sistema all'altro.

#### 11.4.2 Le coordinate

Ogni punto su una carta è determinato dalle sue coordinate: cioè da una coppia di valori angolari o metrici che, riferiti ad un sistema di assi, definiscono la sua ubicazione. Secondo le rappresentazioni cartografiche si hanno pertanto coordinate diverse per ogni singolo punto.

Le coordinate di uso comune sono:

- 1) coordinate geografiche;
- 2) coordinate U.T.M.;
- 3) coordinate Gauss-Boaga;
- 4) coordinate polari.

Le coordinate geografiche di un punto sono espresse con i valori di Latitudine e di Longitudine.

Latitudine ( $\phi$ ) = distanza angolare dall'equatore misurata sui meridiani;

Longitudine ( $\lambda$ ) = distanza angolare dal meridiano fondamentale (Greenwich o Monte Mario), misurata sui paralleli.

La Latitudine varia tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e può essere Nord o Sud mentre la Longitudine varia tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$  e può essere Est o Ovest.

Prima dell'avvento dei sistemi di radiolocalizzazione e di quelli satellitari, la Latitudine si misurava in base all'altezza di un corpo celeste sull'orizzonte (es.: Stella Polare o altri corpi celesti) mediante l'uso del sestante, mentre la Longitudine si calcolava, dal XIX secolo circa in poi, in funzione della differenza oraria tra il meridiano d'origine ed il punto ( $1 \text{ h} \equiv 15^\circ$ ;  $4' \equiv 1^\circ$  di Long.), con un cronometro di precisione.

Sulle tavolette al 25.000 della cartografia nazionale, caratterizzate dal reticolato chilometrico, i valori di Lat. e Long. sono riportati ai bordi in nero se riferiti a Monte Mario e in viola se si fa riferimento al meridiano di Greenwich.

Sulle tavolette le coordinate geografiche si calcolano proiettando il punto interessato sul bordo meridiano e sul bordo parallelo esterni, curando che la proiezione sia perfettamente ortogonale (non utilizzare il reticolato chilometrico in quanto non è orientato correttamente a Nord!). I valori in gradi ed in primi si leggono direttamente, mentre per i secondi (o decimi di primo) si ricorre alla proporzione tra la lunghezza del segmento relativo a  $1'$  e la lunghezza del segmento individuato dalla proiezione del punto.

Occorre far attenzione al fatto che se si fa riferimento al meridiano di Greenwich le Longitudini nel territorio italiano sono tutte Est e crescono sulla carta procedendo verso destra. Se ci si riferisce invece a Monte Mario, le Longitudini possono essere

Est e Ovest e crescere o calare in un senso o nell'altro (Monte Mario: 12° 27' 10,93" E da Greenwich).

Sulle carte nautiche è segnato il reticolato geografico (meridiani e paralleli, secondo la proiezione di Mercatore) e le sole coordinate indicate e ricavabili sono quelle geografiche.

Le coordinate U.T.M. e Gauss-Boaga esprimono la distanza in metri di un punto dall'equatore e dal meridiano di riferimento. Nelle tavolette topografiche il reticolato U.T.M. è riportato in viola (quadrati di 1 km di lato) mentre quello Gauss-Boaga va ricostruito.

Per le coordinate U.T.M. l'origine delle ordinate (equatore) è zero, mentre l'origine delle ascisse ha un valore convenzionale di 500 km. Nella trascrizione delle coordinate di un punto vengono normalmente omesse la prima cifra delle ascisse e le prime due delle ordinate (scritte sulle tavolette in caratteri minori) perché le lettere del quadrato di 100 km, che deriva da una ulteriore suddivisione della zona U.T.M., sono sufficienti ad identificare la zona.

#### 11.4.3 Le carte di uso comune

Le carte di base alle quali fare riferimento e sulle quali riportare informazioni tematiche sono quindi essenzialmente la carta topografica e la carta nautica, in Italia prodotte rispettivamente dall'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) e dall'Istituto Idrografico della Marina (I.I.M.). Entrambe sono oggi disponibili anche come cartografia informatizzata; similmente, alcune Regioni mettono a disposizione i dati topografici relativi alle carte tecniche regionali alla scala 1:10.000 in forma digitale.

La carta topografica è preparata per rappresentare il terreno: le sue caratteristiche fisiche, la vegetazione, le colture, le strade, gli insediamenti, ecc. Essa riporta con precisione i punti salienti della costa e può quindi essere proficuamente utilizzata anche in mare, specialmente se si usano traguardi, allineamenti o stazioni a terra.

La carta nautica è invece costruita essenzialmente come supporto alla navigazione e per la sua sicurezza, ma logicamente è di importanza basilare per un gran numero di settori economici, quali la pesca, l'acquicoltura, l'industria mineraria, il diporto, e quindi anche per la ricerca in mare e l'immersione subacquea.

È bene quindi ribadire le differenze tra queste carte per non lasciare dubbi. Esse sono essenzialmente:

- ✓ la proiezione: Mercatore per le carte nautiche; U.T.M. (o Gauss-Boaga) per le topografiche;
- ✓ le coordinate: paralleli e meridiani per le carte nautiche; reticolato chilometrico per le carte topografiche;
- ✓ la misura delle distanze: sulle carte nautiche non si utilizza la scala di riduzione (che è valida solo lungo il parallelo di tangenza) ma si preferisce utilizzare la nozione che un primo (1') di Latitudine equivale sempre a un miglio nautico (1852 m) a prescindere dalla scala impiegata, anche se la sua lunghezza varia in funzione della latitudine di misura.
- ✓ orientamento: per sottolineare l'importanza della bussola nella navigazione, nelle carte nautiche sono riportati più cerchi graduati con l'orientamento corretto, mentre nelle carte topografiche è indicata solo la declinazione magnetica ed è riportato un grafico esplicativo per orientare correttamente la carta.
- ✓ la linea di costa: nelle due carte può essere diversa perché la carta nautica utilizza come livello di riferimento per le misure di profondità il più basso livello raggiunto dal mare nelle maree sizigiali (zero idrografico), mentre quella topografica

considera il livello medio del mare (zero altimetrico); le paludi e gli stagni costieri non navigabili sono considerati quindi come terra nelle carte nautiche e come acqua in quelle topografiche. Per cartografie bionomiche di grande dettaglio si utilizza come livello di riferimento quello dove compaiono organismi considerati strettamente infralitorali (zero biologico: Bianchi e Morri, 2001).

Per un approfondimento di questo argomento si possono consultare i testi di Colantoni (1999) e Mucedola (1999).

## 11.5 Posizionamento

Esistono molti metodi per determinare la posizione in mare per i quali occorrerebbe una lunga trattazione. Ricordiamo semplicemente in questa sede i principali, rimandando ad altra sede i dettagli operativi.

I metodi più semplici e meno costosi sono i metodi ottici che si utilizzano vicino a costa, semplicemente traguardando dei punti fissi noti sulla costa stessa. La posizione è ottenuta dall'intersezione di linee di rilevamento definite con una bussola, oppure determinando differenze angolari tra punti noti a terra con un sestante. Precisioni più elevate si ottengono con teodoliti e distanziometri operanti da terra.

Sistemi più moderni e più costosi, ma molto pratici, sono i sistemi di radionavigazione, ormai entrati nell'uso comune.

Tra questi, particolare diffusione ha avuto il sistema distanziometrico Mini Range III della Motorola che, come molti altri analoghi sistemi, è in grado di determinare la distanza da due punti noti a terra inviando impulsi radio a delle antenne (*transponder*) e ricevendone la risposta. Ogni distanza costituisce il raggio di un cerchio di posizione.

L'intersezione di due cerchi fornisce la posizione. In questo sistema la precisione è buona (dell'ordine di qualche metro) e varia a seconda della geometria descritta dalla posizione delle antenne rispetto al natante. La portata è invece in funzione dell'altezza delle antenne trasmettenti e riceventi.

Il già citato sistema satellitare GPS, utilizzando 24 satelliti in orbita a circa 20.000 m di altezza, permette di determinare Latitudine, Longitudine e quota con copertura mondiale. Il sistema ha ormai soppiantato il LORAN e fornisce coordinate secondo l'ellissoide WGS 84.

Ogni satellite emette sequenze riconoscibili che consentono al ricevitore di misurare la differenza tra i tempi di partenza e di arrivo dei segnali e quindi di calcolare le distanze. La precisione del sistema dipende dal tipo di ricevitore disponibile che può utilizzare una o due frequenze di emissione e operare con codici di precisione diversi, ma generalmente si aggira nell'ordine di qualche metro per ogni misura di posizione.

È possibile migliorare la precisione dei sistemi commerciali trattando i dati in maniera differenziale. In questo caso si parla di DGPS, attualmente disponibili nelle versioni a differenza di distanza e a differenza di fase. Nel DGPS a differenza di distanza la correzione del segnale viene effettuata da stazioni di riferimento a terra in un punto di coordinate note: dal confronto tra le coordinate fornite dal GPS e quelle del punto noto, vengono calcolati gli errori e quindi le correzioni che debbono essere apportate.

Nel DGPS a differenza di fase il sistema è in grado di calcolare la distanza tra satellite e ricevitore attraverso la misura della fase dei segnali; si ottiene così una correzione dovuta allo spostamento del satellite dalla sua orbita teorica.



## 11.6 Rilevamento

### 11.6.1 Telerilevamento

Lo studio dei fondali può iniziare dal cielo. Le tecniche di telerilevamento sono infatti già ampiamente entrate nell'uso corrente per rilievi di oceanografia (specialmente oceanografia fisica) anche se è sempre necessario tarare le immagini con risultati di analisi eseguite in loco (verità mare).

Per telerilevamento, o *remote sensing*, si intende l'insieme di tecniche di ripresa, elaborazione ed interpretazione di dati che permettono di conoscere a distanza il comportamento delle superfici, sfruttando l'energia elettromagnetica come vettore di informazione. Il telerilevamento consente quindi di conoscere a distanza la natura e lo stato delle superfici investigate e ben si presta all'indagine in campo ambientale.

I possibili metodi di telerilevamento sono quelli satellitari e quelli basati sullo studio di foto aeree. Entrambi consentono una distinzione tra popolamenti e tipi di substrato fino a una profondità di 10-15 m.

#### 11.6.1.1 Tecniche satellitari

L'uso del telerilevamento satellitare in ambiente marino risale agli anni '60 ma solo ultimamente si è assistito ad un grande sviluppo e applicazione di questo strumento grazie all'uso di nuovi sensori con migliorata risoluzione spaziale e radiometrica in grado di misurare con maggiore precisione le variabili dell'ambiente marino; ad una maggiore accessibilità ai dati; alla capacità di elaborare e trasmettere grandi quantità di dati con l'uso dei nuovi strumenti di calcolo; e all'aumentata consapevolezza dei vantaggi del *remote sensing* da parte dei potenziali utenti (Santos, 2000).

La principale caratteristica di un'immagine da satellite è la banda delle lunghezze d'onda che essa rappresenta. Alcune immagini sono la misura della radiazione solare riflessa nell'ultravioletto, nel visibile o nel vicino o medio infrarosso. Altre sono la misura dell'energia emessa dalla terra (l'infrarosso termico), altre ancora misurano l'energia di ritorno di microonde trasmesse dal veicolo stesso. Sistemi di questo ultimo tipo sono denominati attivi in quanto l'energia è fornita dal satellite stesso, gli altri sono detti passivi e dipendono da una fonte di energia esterna, quale il sole. Basandosi sul fatto che ogni oggetto sulla terra e nell'acqua possiede un proprio modo di riflettere le onde elettromagnetiche a seconda della loro lunghezza d'onda, è possibile individuare, separare, mappare e classificare gli oggetti di interesse nel loro contesto geografico di riferimento.

L'energia elettromagnetica che compone l'immagine viene convertita nel passaggio dal sensore al sistema *scanner* del satellite in segnali digitali inviati alle apposite stazioni di ricevimento a terra e registrati in matrici di tante linee e colonne quante sono presenti nel momento dell'acquisizione, formando delle unità minime di risoluzione sulla superficie o sul fondale del mare, o *pixel*. Lo spessore di una linea di scansione è composta da una sequenza di *pixel* adiacenti. La risoluzione spaziale del sensore indica la larghezza della singola linea di *scanner*. La risoluzione del *pixel* (scala) varia da molto elevata (pari a pochi centimetri) a bassa (diversi chilometri).

Assieme alle dimensioni di un'immagine, espressa in chilometri sul terreno, il numero di bande spettrali, la risoluzione radiometrica e la risoluzione temporale e spaziale determinano il volume di dati fornito da un particolare sensore e quindi la quantità di dati che devono essere elaborati. Un'immagine con risoluzione 185 km x 185 km proveniente dal Landsat TM (7 bande di lunghezza d'onda con risoluzione radiometrica di 8 bit, risoluzione spaziale di 30 m), occupa circa 270 Mbytes di dati digitali.



La scelta del giusto sistema satellite/sensore è, per le loro diverse caratteristiche, un punto cruciale per acquisire le immagini idonee in relazione ai fenomeni che si intendono osservare e alla loro scala (NOAA, 2001). Così, ad esempio, il satellite Spot ha un'alta risoluzione sul terreno (20 x 20 m) utile per un'analisi di dettaglio e non è sensibile alla nuvolosità, il Landsat ha una bassa risoluzione (30 x 30 m) utile per impiego su grande scala ma è sensibile alla nuvolosità. Le immagini provenienti dai diversi satelliti possono essere acquistate presso i distributori autorizzati.

L'elaborazione dei dati bruti viene effettuata con l'ausilio di appositi *software* al fine di estrarre le radianze normalizzate che partono dall'acqua (nLw). L'influenza della dispersione molecolare dall'atmosfera viene corretta mediante l'impiego di una procedura di correzione atmosferica che fa riferimento a vari algoritmi e quindi viene normalizzata la radianza legata alla irradianza solare per eliminare l'effetto angolo allo zenit del sole e gli effetti dell'atmosfera.

Un esempio di applicazione di questa metodica per il Mediterraneo si può trovare in Meinesz *et al.* (1991).

#### 11.6.1.2 Foto aerea

A differenza del rilevamento satellitare, la fotografia aerea ha il vantaggio di fornire una risoluzione che può essere scelta dall'utente in accordo con gli obiettivi e con i risultati finali (Pasqualini *et al.*, 1997).

Le foto aeree, seppure con la limitazione imposta dalla penetrazione della luce, possono dare degli ottimi risultati specialmente per quanto riguarda, ad esempio, il limite superiore delle praterie di *Posidonia oceanica* e le zone a bassa profondità, ove d'altra parte può risultare difficile operare con un'imbarcazione (Fig. 1).



Fig. 1 - Foto area obliqua (scattata in condizioni di mare leggermente increspato) di un fondale costiero: le chiazze più scure corrispondono essenzialmente ad aree di fondale con posidonie, quelle chiare a radure di sabbia.

I sistemi attualmente in uso sono la fotografia aerea vera e propria, le immagini video aeree (AVI), i sensori multispettrali aviotrasportati e i sistemi Lidar (*Light Detection And Ranging*). Tutti questi sistemi permettono di ottenere informazioni con una risoluzione maggiore rispetto alle immagini da satellite, ma i dati sono più costosi da ottenere in quanto legati alle ore di volo.

Per quanto riguarda le modalità operative, innanzitutto occorre che le fotografie siano riprese con un apparato fotogrammetrico e ad un'opportuna scala (funzione dell'ottica e dell'altezza di volo). Importante è poi scegliere l'ora adatta per le fotografie in quanto l'altezza del sole sull'orizzonte deve essere ottimale per una migliore penetrazione della luce e non determinare riflessi sulla superficie dell'acqua (le ore migliori sono tra le 11:00 e le 13:00). L'operazione seguente è quella di definire dei punti di riferimento a terra con metodi topografici che possano servire per il giusto orientamento e la restituzione in scala delle coppie stereoscopiche di fotografie. A questo proposito, è anche buona norma fare in modo che le immagini coprano possibilmente 1/3 di mare e 2/3 di terra per facilitare gli allineamenti con buoni punti a terra. Un sistema di posizionamento satellitare GPS geodetico sincronizzato con lo scatto dell'apparecchio fotografico a bordo del velivolo permette un accurato posizionamento delle singole immagini.

La principale limitazione di questo metodo è data dalla trasparenza dell'acqua, ma fin dove penetra la luce (10-20 m al massimo), si possono avere delle ottime informazioni.

Vengono normalmente impiegate pellicole in bianco e nero o a colori che sono sensibili allo spettro del visibile o pellicole all'infrarosso falso colore. Il film all'infrarosso può penetrare a profondità di 5-7 m a seconda della trasparenza dell'acqua. La risoluzione al suolo può essere di 1 m. L'impiego di opportuni filtri può aumentare le possibilità di questo metodo.

Alle normali fotocamere impiegate per questo tipo di riprese, si affiancano i recenti moderni *scanner* multi o iperspettrali operanti nel visibile e nel vicino infrarosso, quali i sensori Daedalus ATM a 12 canali o il Mivis (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) a 102 canali, messo a punto nell'ambito del progetto LARA (Laboratorio Aereo Ricerche Ambientali). Quest'ultimo è un vero e proprio laboratorio aereo allestito nel 1994 dal Consiglio Nazionale delle Ricerche per lo studio delle problematiche ambientali, attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di immagini iperspettrali telerilevate. In particolare, il sistema è modulare, costituito da 4 spettrometri che riprendono simultaneamente la radiazione proveniente dalla superficie terrestre nel visibile, nell'infrarosso visibile, medio e termico, per un totale di 102 canali. Una volta tarata la radiometria con punti verità a terra l'immagine viene processata e agganciata alla cartografia di base con i punti GPS definiti *Ground Control Points*. Dopo aver definito i tematismi e la simbologia delle informazioni cartografiche da rappresentare, sul supporto digitale, vengono riportate la linea di costa, il reticolo con le indicazioni delle coordinate geografiche, la toponomastica. Con sistemi tipo Georast viene poi definito un quadro di unione generale georiferito contenente le carte nella scala predefinita.

Con l'ausilio della fotografia aerea sono state effettuate mappature di praterie di *Posidonia oceanica* fino ad una profondità di 12-15 m (Pasqualini *et al.*, 1998; De Falco *et al.*, 2000).

Il Mivis finora è stato utilizzato ad integrazione dei dati da fotografia aerea tradizionale e da foto da satellite per la mappatura delle praterie di *P. oceanica* lungo le coste della Sardegna (Ministero Ambiente, 2002).

Il sistema attivo Lidar, che può essere usato sia di notte sia di giorno, si basa sulla

riflettanza, dal fondale o da altri oggetti, di un raggio laser emesso da una apparecchiatura alloggiata sul veivolo. Il sistema può essere utilizzato per effettuare un profilo della costa con precisione di 0,3 m fino a 30-50 m di profondità, per identificare formazioni algali (con una risoluzione inferiore ai 10 m), e qualsiasi oggetto in grado di riflettere la luce (Robinsont *et al.*, 1996).

### 11.6.2 Metodi ecografici

I sistemi ecografici permettono di ottenere delle “immagini” del fondo marino utilizzando l’emissione di energia acustica (suono) da parte di un trasmettitore posto in acqua. Il suono viene riflesso verso il trasmettitore dal fondo, dalle asperità o dagli oggetti presenti sul fondale, analizzato e tradotto in una “immagine” del fondale stesso.

Un buon ecografo (nel migliore dei casi interfacciato con il sistema di posizionamento) non dovrebbe mai mancare su una barca da ricerca. Oltre a costituire un elemento di sicurezza per la navigazione, esso fornisce una prima indicazione della morfologia dei fondali e del loro andamento generale, oltre logicamente alla misura della profondità.

Storicamente, i primi sistemi *sonar* in ambiente marino sono stati sviluppati durante la Prima Guerra mondiale da Americani, Inglesi e Francesi per la ricerca dei sottomarini. Essi furono chiamati Asdic (*Anti Submarine Detection Investigation Committee*). Questi primi rudimentali sistemi ebbero poi un grande sviluppo durante la Seconda Guerra mondiale quando l’acustica subacquea fece grandi passi avanti nella ricerca dei sommergibili dalla superficie. Il *sonar* (*SOund NAVigation and Ranging*) divenne così il più importante sistema di ricerca di oggetti sommersi. In questo stesso periodo venne scoperto che con il *sonar* era possibile misurare diverse caratteristiche delle acque, quali la temperatura, e questo strumento venne così utilizzato per lo studio dei movimenti delle acque su vasta scala. I primi e più semplici *sonar*, sfruttando la riflessione del suono dal fondo verso la superficie, venivano utilizzati per misurarne la profondità. Questa profondità era registrata come un punto su una carta o come molti punti lungo una traccia, presentando una immagine del profilo del fondale alle diverse profondità.

Con lo sviluppo della tecnologia sono stati sviluppati migliori metodi di trasmissione e ricezione del segnale così come della sua elaborazione. L’avvento dell’elaborazione digitale del segnale (DSP) ha portato a grandi vantaggi nell’abilità di vedere, definire e conservare le informazioni raccolte con i sistemi *sonar*.

A partire dagli esperimenti per perfezionare il *sonar*, negli anni ‘50 è stato sviluppato il *Side Scan Sonar* (SSS) o *sonar* a scansione laterale. Esso può essere comparato al radar, ma usa echi sonori invece di impulsi elettromagnetici. Il SSS trasmette un segnale acustico ai due lati di un trasmettitore/ricevitore (“pesce”) che viene trainato da una imbarcazione appoggio (Fig. 2). Questo segnale si propaga nell’acqua e sul fondale. Le rugosità del fondo e ogni oggetto presente sul fondale riflettono il segnale incidente nella direzione del *sonar*. Il “pesce” riceve questo segnale riflesso (in realtà è più corretto parlare di riverbero più che di riflesso), lo amplifica e lo invia al processore dei dati e al *display* in superficie.

Esistono diverse pubblicazioni e manuali sull’uso dell’ecografo o *sonar* laterale (Fish e Carr, 1991; Blondel e Murton, 1997) ma, data l’importanza dello strumento, è opportuno accennare alle caratteristiche generali e di impiego.

La forma del fascio emesso dal *sonar* laterale è cruciale nella formazione dell’immagine finale. Tipicamente, un fascio acustico è molto stretto nella sua dimensione



Fig. 2 - "Pesce" di sonar a scansione laterale (*Side Scan Sonar*).

orizzontale (circa 1-2 gradi) e molto ampio in quella verticale (40-60 gradi), con durata dell'impulso pari a  $< 1$  ms. Gli impulsi sonar possono avere una frequenza compresa tra 50 kHz e 1 MHz. Le frequenze più alte (500 kHz - 1 MHz) forniscono maggiore risoluzione ma hanno un *range* minore, cioè lavorano su distanze più brevi (100-150 m per ciascun lato del "pesce" per i 500 kHz); le basse frequenze (50 kHz - 100 kHz) danno una risoluzione minore ma la distanza raggiunta dal segnale è maggiore (600 m per i 100 kHz). La maggior parte dei sistemi oggi in commercio permette all'operatore di scegliere tra due frequenze operative, in genere 100 e 500 kHz.

I segnali di ritorno vengono convertiti in energia elettrica ed inviati, tramite il cavo di traino, al registratore grafico in superficie. Per mezzo di suc-

cessive emissioni e ricezioni (scansione) si forma l'immagine sonora del fondo (o sonogramma) che viene registrata su due canali: di destra e di sinistra. Il centro della registrazione corrisponde al percorso del "pesce". Si ottiene così una rappresentazione che assomiglia molto ad una fotografia aerea inclinata o all'immagine che si avrebbe dagli oblò laterali di un sommergibile che naviga sopra il fondale (Fig. 3).

I classici registratori in scala di grigio forniscono una immagine su carta con oggetti o asperità fortemente riflettenti mostrati come aree scure e, al contrario, nel caso di una totale assenza di segnale di ritorno, come aree bianche. Il meccanismo di registrazione su carta del sonar permette anche ad un canale di dati di visualizzare le informazioni relative alla navigazione. I moderni sistemi di elaborazione e visualizzazione CPS (*Computer-based Sonar Processor*) sono molto simili alle prime immagini su carta ma con l'importante differenza che i dati possono essere colorati con una grande varietà di falsi colori a seconda dell'intensità del segnale per aumentarne l'interpretabilità e possono essere salvati in formato digitale automaticamente durante l'acquisizione.

Le immagini prodotte da sistemi sonar di qualità sono altamente accurate e possono essere utilizzate per delineare anche oggetti molto piccoli ( $> 1$  cm). Per riconoscere bene le strutture del fondo che interessano, occorre una buona combinazione tra velocità di traino del "pesce", scala della registrazione (*range*) e velocità di trascinamento della carta di registrazione (numero di linee per cm). Da questi parametri dipende infatti la grandezza apparente degli oggetti sui sonogrammi che non mostrano mai le loro proporzioni vere. Esiste quindi una distorsione legata alla velo-



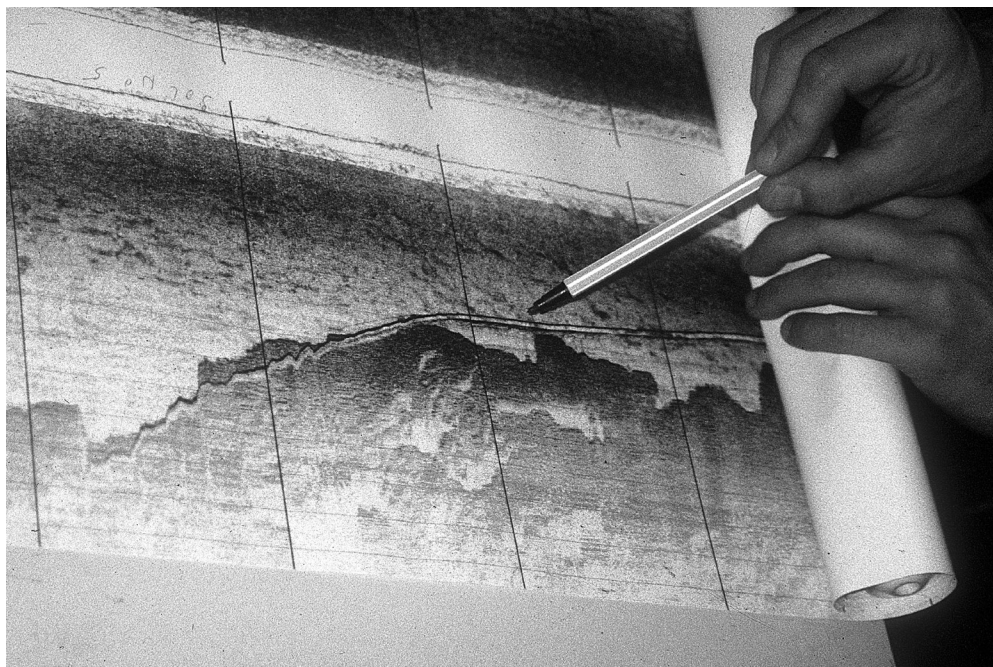


Fig. 3 - Esempio di un tracciato di sonogramma in cui si riconoscono il limite inferiore di una prateria di posidonie (con radure sabbiose) ed una condotta sottomarina (indicata dalla punta del pennarello).

cità di traino del “pesce” ed un'altra legata all'inclinazione della scala (*slant range*) che occorre correggere per riportare la rappresentazione nelle giuste proporzioni per essere cartografata. I moderni sistemi SSS, per mezzo di microprocessori incorporati, sono in grado di correggere automaticamente le distorsioni e di rimuovere la colonna d'acqua nelle registrazioni.

I rilevamenti normalmente vengono previsti lungo rotte parallele, spaziate tra di loro in modo di avere un certo grado di sovrapposizione delle immagini raccolte che assicuri la copertura totale del fondale. Una delle metodiche più usate prevede la distanza tra le rotte pari al 50% di sovrapposizione.

Il *range* di un *sonar* laterale si riferisce normalmente al *range* spazzato da ogni lato. Per esempio, un *range* di 150 m per canale fornisce un'area totale spazzata pari a 300 m. È da tenere presente comunque che ogni meccanismo di visualizzazione (*display*, schermo) ha una limitata dimensione dei *pixel* e minori *range* forniscono le migliori risoluzioni sul *display*.

A causa della perdita del segnale per assorbimento sul fondale, riflessione e diffusione del raggio, il *sonar* laterale ha un limite pratico nel suo campo di azione. Come regola generale, la larghezza del fascio viene impostata a 10 volte la profondità dell'acqua. Per esempio, se il rilevamento viene condotto in acque profonde 10 m, si può utilizzare una larghezza di 100 m per canale.

Il *sonar* laterale è difficilmente utilizzabile in acque con profondità inferiore ai 5 m a causa della presenza di una grande quantità di echi che aumentano il livello del rumore di fondo e peggiorano la qualità dei dati. Al di sopra di questa profondità possono esserci anche problemi operativi con l'imbarcazione appoggio. Anche

le variazioni batimetriche possono influenzare i parametri di acquisizione e quindi la qualità del dato.

La successiva fase è quella del *post-processing* dei dati. Per risolvere il problema della limitata copertura della singola “strisciata” è stato sviluppato il metodo della “mosaicatura”. I dati digitali del *sonar* laterale sono composti da *pixels* geo-referenziati. I mosaici sono diverse serie di passate parallele unite insieme a formare un’immagine che copre un’ampia area, mantenendo la risoluzione.

Non meno importante è la fase di interpretazione dei risultati. La proprietà degli oggetti presenti sul fondale determina la capacità di riflessione acustica del fondale stesso. Nella registrazione *sonar* le ombre sono il più importante strumento interpretativo. Esse sono la caratteristica principale che fornisce una qualità tridimensionale al sonogramma bidimensionale. Le ombre sono prodotte da oggetti in rilievo o in depressione sul fondale, dalla loro posizione, forma e intensità. Oggetti traslucidi forniscono un’ombra leggera, la roccia, banchi di sabbia, relitti forniscono ombre scure molto nette. L’intensità dell’ombra dice molto circa il materiale dell’oggetto che le ha prodotte. Le cause delle aree più chiare in un sonogramma vengono classificate generalmente in tre categorie: 1) zone d’ombra causate da oggetti acusticamente opachi che ostacolano il segnale *sonar*; 2) aree con topografia del fondale meno riflettente al segnale *sonar* come sedimenti mobili e lisci; 3) aree che sono orientate in modo da offrire una minima superficie riflettente alle onde sonore, quali il fondale o gli oggetti a diversa inclinazione o pendenza. L’esperienza di chi interpreta il sonogramma è quindi di grande importanza.

Le scale di restituzione grafica dei rilievi con *sonar* laterale sono, in genere, comprese tra 1:25 000, per aree estese, e 1:1 000 per situazioni di dettaglio. I costi elevati dello strumento, o del suo noleggio, sono compensati dalla velocità con cui si riescono a rilevare ampi tratti di fondale.

In Italia, una delle primissime applicazioni del *sonar* laterale per cartografare le caratteristiche di un fondale marino è quella di Colantoni *et al.* (1982) nelle acque di Ischia. Il risultato è stato la stesura di una carta delle biocenosi bentiche, con particolare riferimento alle praterie di *Posidonia oceanica*. Lo strumento infatti, fin dai suoi primi impieghi, si è rivelato molto utile proprio per la cartografia delle praterie di posidonie e di alcune sue caratteristiche quali copertura, tipo di margine (eventuali gradini di erosione), impatto antropico (tracce di ancoraggi o di danni provocati dalla pesca a strascico illegale); permette inoltre di distinguere anche i prati di *Cymodocea nodosa*.

### 11.6.3 Sistemi video controllati a distanza

Telecamere montate su veicoli subacquei controllati a distanza possono essere impiegate per semplici ispezioni o per rilevamenti finalizzati alla restituzione cartografica (Ardizzone, 1992). Le ispezioni si avvantaggiano dell’uso dei ROV (*Remote Operated Vehicle*), veicoli filoguidati dalla superficie e dotati di sistemi di propulsione autonomi (Fig. 4). Questi mezzi consentono all’operatore in superficie di guidare il veicolo dove più interessa, controllando per mezzo di un *monitor* ciò che è ripreso dalla telecamera sul fondo (Fig. 5). Naturalmente le immagini ricevute a bordo possono essere registrate per poi essere rianalizzate. La guida del veicolo è normalmente effettuata con l’ausilio di alcuni strumenti quali bussola e profundimetro le cui informazioni appaiono sul *monitor* in sovrapposizione con le immagini del fondale. L’impiego del ROV, se da una parte ha il gran vantaggio di consentire spostamenti

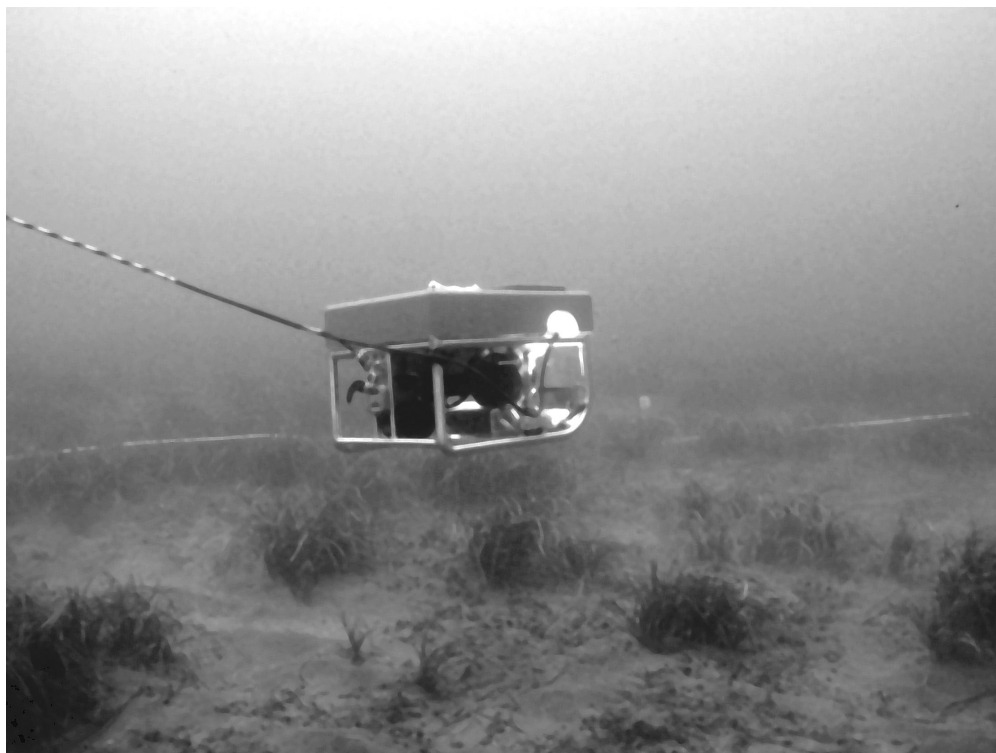


Fig. 4 - Veicolo filoguidato (ROV).



assai precisi per osservare ciò che interessa con la possibilità di “guidare” la ripresa dove si vuole, dall'altra ha costi elevati, lentezza di esplorazione, e spesso impossibilità di georeferenziare quanto osservato. Infatti i movimenti estremamente irregolari che spesso vengono compiuti operando con la propulsione del veicolo non possono essere ricostruiti facilmente né dai GPS a bordo della imbarcazione appoggio (che ha scarsa coerenza con i movimenti del ROV) né da antenne GPS posizionate sul cavo che collega il ROV alla superficie. Una soluzione può essere rappresentata da un sistema comprensivo di un *pinger* installato sul veicolo immerso e di boe di superficie posizionate con GPS (Sgorbini *et al.*, 2002).

Fig. 5 - Stazione di bordo per il controllo di un veicolo filoguidato (ROV). Il ROV viene comandato per mezzo di una *console* con *joystick* e controllato attraverso il video, sui cui possono anche comparire le indicazioni di bussola, profonditàmetro e altimetro.



Per l'esecuzione di lunghi transetti di rilevamento, la telecamera può essere utilmente impiegata su un veicolo trainato dall'imbarcazione appoggio (Ardizzone, 1992). La qualità della telecamera e quindi delle riprese rimane la stessa, e le immagini sono ugualmente inviate a bordo via cavo così come le informazioni su rotta e profondità; la navigazione, però, non è più controllata dai propulsori del ROV ma dal traino dell'imbarcazione appoggio. Questo impedisce cambi repentini nei movimenti del veicolo dovuti all'inerzia del traino e quindi di conseguenza anche soste per il controllo di un particolare, ma permette di posizionare correttamente da un punto di vista geografico le immagini raccolte. Infatti i sistemi di posizionamento dell'imbarcazione sono in grado di registrare le rotte seguite durante ogni ispezione e il veicolo unito all'imbarcazione tramite cavo può essere considerato solidale a questa a meno di uno scarto stimabile e correggibile, dovuto alla distanza dell'imbarcazione dal veicolo. I sistemi *plotter* di navigazione satellitare con registrazione della rotta percorsa sono in grado di consentire un ottimo controllo della navigazione in un piano di campionamento mediante veicolo trainato lungo transetti. Il veicolo è trainato lungo rotte predeterminate che hanno generalmente un andamento ortogonale alla costa e possono essere tra loro parallele o alternativamente convergenti per realizzare un unico percorso di navigazione. Il vantaggio di transetti ortogonali alla costa è quello di permettere la migliore interpolazione possibile per conformazioni biocenotiche normalmente strettamente correlate con l'andamento batimetrico. La fase operativa prevede quindi la registrazione delle immagini dei fondali lungo i transetti previsti dal disegno di campionamento. Il veicolo con telecamera è trainato ad un'altezza dal fondo variabile da 1,5 a 15 metri. La velocità massima di traino è di 2-3 nodi e deve essere realizzata con imbarcazioni di dimensioni limitate per permettere una buona manovrabilità.

Attualmente si trovano in commercio diversi prodotti commerciali appartenenti alle classi *eyeball* (piccoli sistemi portatili, altamente manovrabili e con la possibilità di essere usati da piccole imbarcazioni), *portable open frame* (sistemi di medie dimensioni, capaci di buone prestazioni con pesi e ingombri contenuti), *workclass* (grandi sistemi del peso di 2-3 tonnellate utilizzati soprattutto nell'industria *off-shore* fino a 2000-3000 m di profondità). L'evoluzione di questi strumenti è rappresentata dai cosiddetti AMV (*Autonomous Marine Vehicle*), vere e proprie piattaforme autonome (senza cavo ombelicale o pilota o altra comunicazione), capaci di movimenti pre-programmati nell'acqua, dotati di sistemi di navigazione inerziale e in grado di portare diversi sensori: telecamere, *sonar*, ecc.

#### 11.6.4 Rilevamenti subacquei

Il rilievo subacqueo a fini cartografici ha grande importanza qualora si operi a scala di dettaglio: la metodica più diffusa è quella dei transetti bionomici (Bianchi *et al.*, 1999). Essa consiste nell'effettuare un percorso, tipicamente dal fondo verso la superficie (transetto verticale o transetto di profondità), lungo una cima metrata disposta perpendicolarmente alla costa, annotando le proprie osservazioni in relazione a due coordinate rappresentate dalla distanza lungo la cima e dalla profondità (Fig. 6).

Il metodo del transetto è adatto a caratterizzazioni su base essenzialmente fisiologica dei popolamenti che si incontrano lungo il percorso; inoltre esso si presta particolarmente al lavoro in coppia con un geomorfologo, che lungo il transetto rileva la morfologia del fondale, le caratteristiche sedimentologiche e litologiche, ecc.

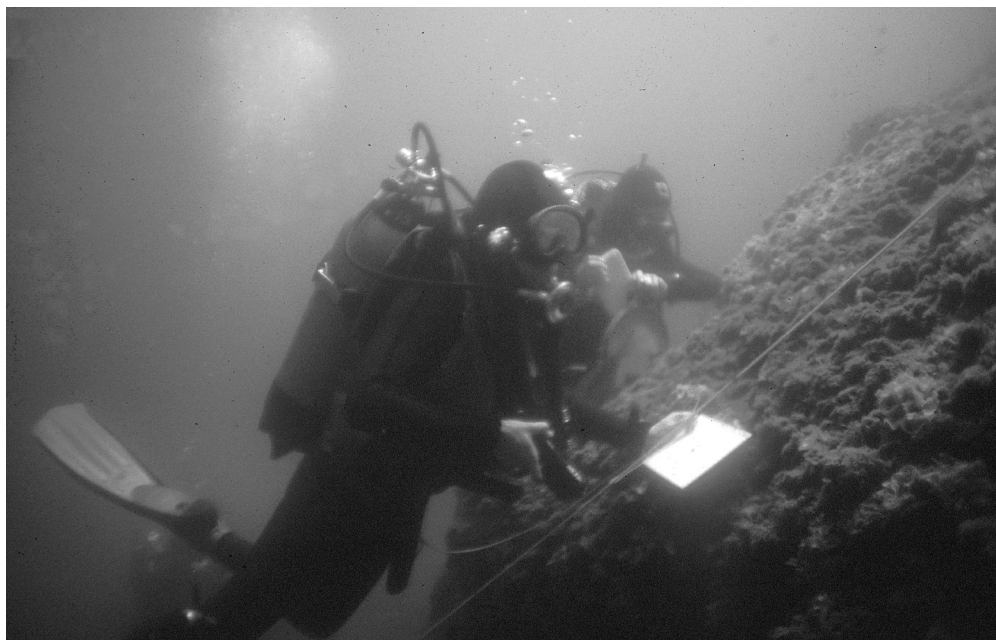


Fig. 6 - Rilevamento in immersione subacquea lungo un transetto.

Solitamente è utile rilevare anche il profilo del fondo contemporaneamente alle osservazioni bionomiche: è meglio che uno dei due sommozzatori che eseguono il transetto si occupi solo di questo aspetto. Se è necessario operare da soli, il sommozzatore si trova a dover ripercorre più volte uno stesso tratto di cima per effettuare tutte le osservazioni necessarie: di ciò bisogna tenere conto nella programmazione dell'immersione.

Ad ogni caposaldo (effettuato in corrispondenza di un punto del fondale topograficamente saliente o in presenza di una chiara discontinuità bionomica) si rilevano: i) profondità; ii) distanza progressiva lungo la cima; iii) direzione bussola; iv) pendenza del substrato; v) ogni altra osservazione utile sulle caratteristiche del fondale. Le osservazioni bionomiche vanno riferite di volta in volta alla tratta tra due capisaldi successivi. Un esempio di utilizzo della tecnica dei transetti si può trovare in Balduzzi *et al.* (1994).

La lunghezza dei transetti varia secondo le situazioni e le necessità. Per percorsi molto lunghi è utile fare uso di *scooter* subacquei (Fig. 7); oppure il sommozzatore può essere trainato (Sigl *et al.*, 1969).

Un problema di cui è importante tenere conto è che lungo coste molto acclivi si raggiungono immediatamente profondità elevate anche con cime relativamente brevi: per questo motivo, l'effettuazione di transetti oltre i 30 m richiede notevole efficienza operativa e grande attenzione ai tempi di decompressione, anche in considerazione del fatto che una topografia accidentata può comportare variazioni di quota impreviste (Fig. 8).

Un'estensione del metodo dei transetti, applicabile per cartografie di notevole dettaglio, consiste nel disporre di più cime metrature in modo da formare un reticolo di varia ampiezza (Bianchi *et al.*, 1999).



Fig. 7 – Rilevamento in immersione autonoma lungo un transetto con l'ausilio di *scooter* subacquei.

Ulteriori metodiche di rilevamento bionomico subacqueo standardizzate sono presentate in due manuali di ottima fattura curati da English *et al.* (1997) e Kingsford e Battershill (1998), ai quali si rimanda per gli opportuni approfondimenti. Utili referenze per la programmazione e l'esecuzione delle immersioni di tipo scientifico si possono inoltre trovare in Colantoni (1980), Fleming e Max (1996), e NOAA (2002).

### 11.6.5 Campionamenti puntiformi

Le tecniche di campionamento variano a seconda se si deve campionare su fondi molli o su fondi duri. Una ampia letteratura su questo argomento è disponibile in Holme e McIntyre (1984) e NOAA (2001).

Su fondi molli viene preferito il campionamento indiretto, dalla superficie, tramite draga o benna. La draga, trascinata sul fondo lungo un tragitto predefinito, raccoglie gli organismi presenti sul sedimento o a qualche centimetro di profondità e di dimensioni maggiori a quelle delle maglie della rete impiegata; i dati ottenuti sono di tipo qualitativo, ma moltiplicando la larghezza della bocca della draga per la lunghezza percorsa dallo strumento, si ottiene una stima della superficie totale strascinata, con cui è possibile effettuare anche considerazioni di tipo (semi-)quantitativo.

In alcuni casi è stata similmente utilizzata anche la rete a strascico (Relini, 1998; Bertrand *et al.*, 2002).

La benna, calata lungo la verticale, si richiude automaticamente non appena tocca il fondo, raccogliendo il sedimento su una superficie standard, rispetto alla quale

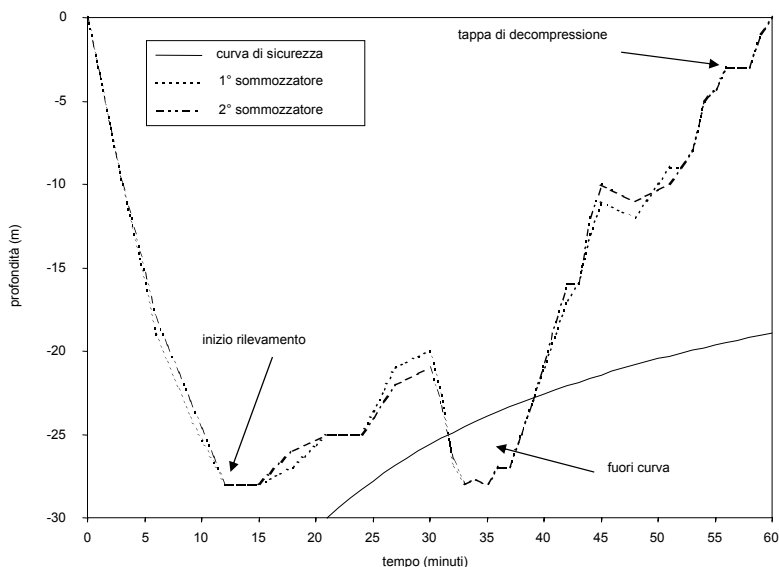


Fig. 8 - Profilo di immersione di due sommozzatori scientifici che hanno effettuato il rilevamento di una secca rocciosa la cui topografia ha comportato variazioni di quota durante l'immersione.

possono essere condotte elaborazioni di tipo quantitativo. Ancor più della benna, il *box-corer* consente di prelevare una porzione discreta di fondo mobile, mantenendo inalterata la compagine dei sedimenti e del benthos: è tuttavia considerato poco adatto a scopi di cartografia bionomica, anche a causa delle dimensioni solitamente ridotte della scatola campionatrice. Per maggiori dettagli vedi Cap. 4.

Sui fondi duri, e se la profondità lo consente, è preferibile l'impiego dell'operatore subacqueo. Questo opera in immersione con autorespiratore, utilizzando tecniche di censimento visivo, di campionamento fotografico e di prelievo per identificare le biocenosi presenti.

L'utilizzo di campionamenti puntiformi rende necessario l'uso di tecniche di interpolazione che consentano di tracciare sulla carta delle curve di distribuzione. L'interpolazione può essere fatta empiricamente, ad occhio, oppure con diverse tecniche statistico-matematiche: esperienze in mari italiani hanno utilizzato la *trend-surface analysis* ed il *kriging* (Bianchi *et al.*, 1985; Scardi *et al.*, 1989; Cantone *et al.*, 2000). Per approfondimenti sulle tecniche geostatistiche si rimanda ai testi specialistici (ad es., Bruno e Raspa, 1994).

#### 11.6.6. Integrazione tra metodi diversi

In questi ultimi anni per la realizzazione di cartografie si è diffuso un uso integrato dei diversi sistemi di raccolta dati fin qui descritti. I vari metodi di rilevamento hanno infatti un diverso significato a seconda dell'ambiente da esplorare e della scala di restituzione finale.

Così, ad esempio, se la fascia più costiera fino ai 10-15 m di profondità è ben descrivibile con fotografia aerea, le maggiori profondità hanno necessità di essere esplorate con *sonar* laterale. Inoltre, per aree limitate dove sia richiesto un maggior

dettaglio sarà necessaria una raccolta di informazioni tramite telecamere (ROV) e/o subacquei (Fig. 9).

Una integrazione di sistemi di teledetezione aerea e sistemi *sonar* è stata impiegata per la mappatura delle praterie di posidonie da Paillard *et al.* (1993) e da Acunto *et al.* (2000). Esempi in mari italiani di cartografie bionomiche realizzate integrando metodi



Fig. 9 - Utilizzo congiunto di rilevamento subacqueo e veicolo filoguidato (ROV).

diversi si possono trovare in Navone *et al.* (1992) e in Bianchi *et al.* (1996). Somaschini *et al.* (1998) hanno effettuato una caratterizzazione dei fondi molli e delle praterie di posidonie con un approccio misto: raccolta immagini video con telecamera filoguidata, campionamento puntiforme di benthos, e restituzione cartografica finale mediante GIS.

## 11.7 Restituzione

### 11.7.1 Scala

La scelta della scala condiziona notevolmente le modalità di restituzione tanto per la capacità di rappresentazione del particolare quanto per la codifica dei simboli da adottare.

In realtà essa condiziona molto anche la scelta della metodica di rilevamento in quanto al variare della scala di restituzione deve variare il dettaglio dell'informazione raccolta.

Il lavoro di Meinesz *et al.* (1983) si ricollega alla codifica bionomica di Pérès e Picard (1964) anche se con alcune sostanziali modifiche e definisce una serie di simboli per le rappresentazioni cartografiche per scale fino a 1:5.000. Le scale di minor dettaglio (da 1:5.000 a oltre 1:50.000) necessitano la semplificazione dei simboli e il raggruppamento delle biocenosi da rappresentare. Ardizzone (1992) e Bianchi *et al.* (1996) suggeriscono le scale che possono essere adottate in funzione delle unità che si vogliono rappresentare.

Scale molto ampie sono adatte per rappresentare con grande dettaglio piccole aree in cui siano dominanti i fondi rocciosi. Gili *et al.* (1984), ad esempio, hanno scelto una scala finale 1:1.400 circa per mappare i popolamenti di una piccola riserva marina della costa catalana, le Illes Medes.

Scale intermedie sono preferibili per zone più vaste, ma che mantengono comunque una certa unità fisiografica. Navone e Bianchi (1992) hanno rappresentato in scala 1:25.000 l'intera riserva marina di Tavolara - Capo Coda Cavallo (Sardegna NE), e similmente Morri *et al.* (1986) hanno scelto la scala 1:30.000 per mappare le biocenosi marine bentiche tra Punta della Chiappa e Sestri Levante (Mar Ligure). Nelle sue "Carte biocenotiche dei mari pugliesi", Parenzan (1983) ha adottato la scala di circa 1:40.000 da Barletta a Taranto, e di circa 1:160.000 da Lesina a Barletta.

Scale piccole sono invece indicate quando si vuole rappresentare in maniera sinottica i maggiori popolamenti di un'intera regione piuttosto vasta. Ad esempio, Bianchi e Morri (1989) hanno redatto una carta biocenotica in scala 1:500.000 nell'ambito di uno studio dedicato alla definizione delle ecotipologie presenti lungo le coste pugliesi, e Bianchi *et al.* (1996) hanno realizzato la carta bionomica dei mari toscani in scala 1:250.000. Tali scale non permettono ovviamente il dettaglio sufficiente per la rappresentazione adeguata di alcuni popolamenti, quali quelli legati ai fondi duri e, più in generale, tutti quelli più strettamente costieri.

È però importante sottolineare che la scelta della scala non comporta solamente, come è ovvio, un maggiore o minore dettaglio: essa influisce invece sul significato stesso dei fenomeni rappresentati (Bianchi *et al.*, 1996)

### 11.7.2 Tipologia delle legende

La cartografia bionomica tradizionale (Meinesz *et al.*, 1983) prevede solitamente un solo tipo di legenda: le unità di popolamento, denominate biocenosi, comunità, associazioni, formazioni, ecc. a seconda della scuola cui si fa riferimento (Bianchi, 1999; Bianchi e Morri, 2001). Su questa base può agevolmente essere aggiunto un secondo livello di legenda, integrativo al primo: la presenza di alcune specie particolarmente significative dal punto di vista ecologico-bionomico o per altri motivi di interesse; tali specie possono entrare direttamente a far parte della denominazione dell'unità di popolamento che le contiene (ad es., le zooecnosi di Vatova, 1949).

Il fatto che l'individuazione e la delimitazione di unità di popolamento siano in genere considerate sufficienti per la rappresentazione della realtà bionomica di un sito, tradisce l'impostazione derivante dalla cosiddetta ecologia dell'equilibrio, che ha caratterizzato il pensiero ecologico di gran parte di questo secolo. Tale approccio, riassunto nell'espressione *the balance of nature*, ritiene che in condizioni naturali le comunità biologiche siano stabili ed in perfetto equilibrio con le condizioni medie dell'ambiente (Pérès e Picard, 1964): definire le comunità, quindi, equivale a definire in maniera sintetica ed univoca l'ambiente.

In anni più recenti, questo modo di pensare è stato sfidato dall'ecologia del non-equilibrio, la cosiddetta *new ecology*, che assegna un ruolo chiave al disturbo (*disturbance*) come regolatore della composizione e struttura delle comunità, anche attraverso meccanismi di eterogeneità fisica e mosaici spazio-temporali generati dalla cosiddetta *patch dynamics*.

Nella cartografia bionomica è quindi utile aggiungere un terzo livello di legenda che esprima gli aspetti dinamici, piuttosto che una illusoria situazione d'equilibrio, reale o potenziale. Si tratta di un tentativo di superare la semplice fase di cartografia descrittiva per giungere piuttosto a porre in risalto le trasformazioni in atto e le tendenze evolutive degli ecosistemi.



### 11.7.2.1 Unità di popolamento

Dal punto di vista grafico, le biocenosi-tipo possono essere rappresentate ognuna con un colore uniforme e leggero che sia in qualche modo evocativo: verde per le praterie di fanerogame, giallo per i fondi sabbiosi, beige per i fanghi terrigeni, mattonone per i fondi detritici costieri.

Le differenti *facies* possono invece essere rappresentate mediante la sovrapposizione di retini, come quelli proposti da Meinesz *et al.* (1983), di colore marcato. L'adozione di questi criteri rende più agevole il riconoscimento delle affinità bionomiche, delle differenziazioni più vistose, e delle transizioni. Ulteriori suggerimenti si possono trovare in Cinelli *et al.* (1995).

### 11.7.2.2 Specie significative

Le specie significative possono essere riportate sulla carta in colore nero con una sigla (derivante dalle iniziali di genere e specie). In legenda possono essere divise, per comodità, in tre gruppi principali: 1) caratteristiche di biocenosi; 2) indicatrici; 3) altre.

Per quanto riguarda le specie caratteristiche di biocenosi, si fa essenzialmente riferimento al *Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée* (Pérès e Picard, 1964) e successivi aggiornamenti.

Sono denominate indicatrici quelle specie la cui presenza può fornire informazioni sulla qualità dell'ambiente (Bellan, 1991). La loro esuberanza quantitativa suggerisce talvolta l'alterazione dei normali rapporti tra popolamenti biologici e fattori climatici ed edafici.

Alla voce "altre" si possono infine elencare specie di valenza ecologica nota, corrispondenti almeno in alcuni casi a quelle che Picard (1965) definì specie accompagnatrici: si tratta, in pratica, di specie che risultano legate a specifici fattori climatici ed edafici. In un certo senso, quindi, anche queste specie possono fungere da indicatore, rivelando con la loro abbondanza l'influenza dei fattori per i quali esse sono specializzate (Morri *et al.*, 1991).

### 11.7.2.3 Dinamica

La tendenza dinamica dei popolamenti cartografati può essere presunta sulla base di indicazioni molteplici derivanti dalla presenza di particolari *facies* o dall'abbondanza di specie in qualche modo indicatrici (vedi sopra), dalla struttura quantitativa dei popolamenti (in particolare abbondanza, ricchezza e diversità), nonché dalla loro fisionomia generale. In qualche caso sono utili le osservazioni relative alle caratteristiche del substrato, alla tipologia della tanatocenosi ed alla natura e quantità di detrito presente.

Per indicare sulla carta gli aspetti dinamici, Bianchi *et al.* (1996) hanno sviluppato una simbologia *ad hoc*, sovrapposta in colore nero agli altri tematismi, costituita da vari tipi di piccole frecce, da lettere dell'alfabeto greco e da vari altri segni grafici che potessero in qualche modo apparire evocativi del concetto rappresentato (Fig. 10).

Esempi di raffigurazione su carte bionomiche degli aspetti dinamici con una simile simbologia si possono trovare in Navone e Bianchi (1992), Bianchi e Peirano (1995), Bianchi *et al.* (1996) e De Biasi e Gai (2000).































FENOMENOLOGIE E PROCESSI	FATTORI ECOLOGICI	SERIAZIONI E TENDENZE
 Limite di settore bionomico	 Controllo biotico	 Bioconcrezionamento
 Insieme frontolitorale	 Controllo edafico	 Infangamento
 Insieme prelitoreale	 Correnti di fondo	 Mosaicatura, disturbo
 Apporti biotici esogeni	 Correnti vorticosi ascensionali	 Arricchimento (perturbazione debole)
 Transizione cenotica	 Sedimentazione minerale	 Impoverimento (perturbazione forte)
 Instabilità	 Sedimentazione organica	 Denaturazione
 Diversificazione	 Sedimentazione rapida e/o intensa	 Regressione
 Sostituzione	 Decantazione	 Eutrofizzazione
 Climax	 Confinamento	 Degrado antropico
	 Influsso del largo	

Fig. 10 - Simboli proposti da Bianchi *et al.* (1996) per rappresentare cartograficamente gli aspetti dinamici delle biocenosi bentiche.

### 11.8 Sistemi Informativi Geografici (GIS)

L'impiego dei Sistemi Informativi Geografici, più noti con l'acronimo inglese GIS (*Geographical Information Systems*), è di estrema efficacia per raccogliere, integrare, gestire ed analizzare grandi quantità di dati eterogenei; infatti mediante semplici operazioni di sovrapposizione delle carte, consente di semplificare il confronto tra i diversi dati a disposizione e, attraverso la combinazione degli stessi, l'analisi e lo studio di particolari emergenze ambientali. Nonostante da diversi anni la comunità scientifica abbia riconosciuto l'importanza dei GIS, il loro impiego nel campo della bionomia del benthos, soprattutto in Italia, è stato abbastanza limitato (Tunesi *et al.*, 2002).

Un Sistema Informativo Geografico è un insieme di strumenti per raccogliere, archiviare, trasformare e visualizzare dati spaziali e dati non spaziali, un sistema di sostegno alle decisioni che implica l'integrazione di dati spazialmente riferiti in un ambiente, orientato alla risoluzione di problemi ed all'analisi ed alla modellizzazione di fenomeni che avvengono sulla superficie terrestre.

La tecnologia GIS consente di posizionare ed analizzare oggetti ed eventi che esistono e si verificano sulla Terra, e di integrare alle operazioni standard effettuate sui *database* più comuni (quali ricerche ed analisi statistiche), le funzionalità proprie dei GIS.

Queste ultime sono riconducibili alla memorizzazione ed all'immagazzinamento dei dati, alla loro manipolazione ed analisi, alla creazione di rappresentazioni e copie di *output* (carte e tabelle); sono inoltre accompagnate da vantaggi specifici forniti dalle mappe, quali la visualizzazione e l'analisi geografica.

Queste attitudini distinguono i GIS dagli altri sistemi informativi, rendendoli strumenti di notevole valore, importanti per tutti coloro che hanno la necessità di visualizzare ed analizzare informazioni per spiegare eventi, prevedere esiti e risultati, pianificare strategie.

Le molteplici proprietà di un GIS sono motivate dal fatto che il sistema è costituito da più componenti integrate, ognuna in grado di assolvere a specifiche funzioni.

Generalmente un GIS è caratterizzato dai seguenti moduli:

- di caricamento dati, finalizzato alla conversione delle informazioni in formato numerico o digitale; questa può avvenire mediante digitalizzazione, conversione da altri sistemi, acquisizione da *scanner*, da satellite o da GPS;
- di archiviazione e gestione dei dati, con la creazione di *database* atti a accogliere i dati, aggiornarli e modificarli;
- di analisi dei dati, mediante operazioni di analisi che trasformano i dati in informazioni descrittive;
- di restituzione dei dati, tramite visualizzazione su schermo, su carte stampate, attraverso la produzione di rapporti statistici e tabelle.

La digitalizzazione di una mappa è il procedimento che consente di trasformare gli elementi geometrici presenti sulla carta (punti, linee) da formato analogico (mappa cartacea), a formato digitale, creando un *database* cartografico vettoriale. La carta può essere acquisita indifferentemente da tavolo o da *monitor*; in questo caso è necessario operare su di un'immagine *raster*, a sua volta ottenuta mediante scansione della carta originale (con *scanner*). La digitalizzazione da tavolo consiste nell'impiego di un *mouse* collegato al tavolo che, trascinato sugli oggetti, ne riproduce l'immagine, come elemento vettoriale, direttamente su *file* (*coverage*) all'interno del computer.

Una delle principali caratteristiche dei GIS è costituita dalla capacità di integrare dati diversi per provenienza e natura, in relazione alla proiezione, al sistema di riferimento, alla scala ed al modello di rappresentazione. Infatti i dati possono essere confrontati soltanto quando sono nello stesso sistema di coordinate, nella stessa scala e nello stesso formato. Una volta integrati, i dati possono essere elaborati geograficamente, stabilendo relazioni spaziali tra gli elementi che risiedono su differenti livelli (*layers*).

Le funzioni utilizzate per l'elaborazione dei dati al fine di estrarne informazioni possono essere temporanee o permanenti.

Le interrogazioni, condotte con gli strumenti di cui il sistema è dotato, permettono di identificare ed estrarre dal *database* geografico soltanto quegli elementi che possiedono gli attributi di specifico interesse, evidenziandoli o isolandoli dal tema di appartenenza. Le interrogazioni si svolgono chiedendo al sistema di estrarre dal *database* i dati secondo i criteri di ricerca definiti dall'utente. Esse possono essere condotte sia sugli elementi geografici o sui loro attributi, sia su entrambi contemporaneamente. Il risultato delle interrogazioni può essere salvato su di un nuovo tema, o visualizzato temporaneamente.

La cartografia tematica costituisce una delle funzionalità più note dei GIS e presenta notevoli potenzialità poiché può essere:

- restituita nei formati e nelle scale desiderate;
- esportata nei vari formati di interscambio comuni a tutti i GIS;
- salvata in CD-ROM multimediali, nei quali le carte tematiche sono rese interattive con l'associazione a punti, ad aree ed a siti, di testi, dati, foto, filmati e commenti sonori, per una migliore valorizzazione dei progetti;
- pubblicata in Internet, consentendo la distribuzione e la fruizione dei dati anche in modo controllato (aspetto di particolare interesse per le Pubbliche Amministrazioni).

L'approccio GIS non è l'unico che permette di realizzare mappe e di consentire l'analisi geografica, tuttavia può essere considerato quello attualmente più efficace e veloce.

I dati e le informazioni che concorrono a costituire un GIS devono essere organizzati secondo criteri logici e strutturati in relazione al loro significato spaziale.

È necessario ricordare che tutti i dati che confluiscono in un *database* geografico sono costituiti da due parti: l'elemento grafico, denominato *feature* (punto, linea, poligono...), e gli attributi ad esso associati, come campi, *items* (numerici, testuali...), presenti nelle tabelle relazionate.

Tutti gli elementi geografici sono organizzati in temi, ovvero insiemi di elementi concettualmente correlati. Questi tipi di *file* sono chiamati *coverage*, ovvero coperture. A ciascuna *coverage* può essere associata una topologia, cioè un'informazione contenente le relazioni spaziali che intercorrono tra i diversi oggetti in essa contenuti. Una *coverage* può dunque essere puntuale, lineare o poligonale.

I GIS molto spesso sono in grado di creare automaticamente una tabella associata agli elementi geografici, nella quale sono automaticamente calcolati ed inseriti alcuni attributi (*items*) quali area, perimetro o lunghezza.

L'uso di semplici comandi consente di visualizzare le caratteristiche delle *coverage* e verificare, ad esempio, che sia stato definito un sistema di coordinate. La gestione dei dati geografici e dei loro attributi in un unico tema, permette di aggiungere o eliminare gli attributi ogni qual volta ciò si renda necessario.

A ciascuna *coverage* è associato un *file* di testo che contiene le principali informazioni (*metadata*) legate al dato stesso; tali informazioni riguardano sia gli aspetti puramente tecnici del *file* (ad esempio la precisione ed il sistema di riferimento), sia notizie utili agli utenti (età del dato, fonti bibliografiche, ecc.).

La rappresentazione degli elementi grafici avviene mediante *shadeset*, ovvero *file* di legenda, contenenti campiture, simboli e colori diversi. I *software* GIS includono degli *shadeset* con molteplici simboli e colori, ma ne consentono anche la creazione di nuovi, in relazione a specifiche esigenze.

## 11.9 Bibliografia

- ACUNTO S., PIAZZI L., CINELLI F. (2000) - Mappatura delle praterie di *Posidonia oceanica* dell'isola d'Elba mediante sonar a scansione laterale e teledetezione aerotrasportata. *Biol. Mar. Medit.*, **7** (1): 495-498.
- ALBERTELLI G., BEDULLI D., CATTANEO-VIETTI R., CHIANTORE M., GIACOBBE S., JERACE S., LEONARDI M., PRIANO F., SCHIAPARELLI S., SPANÒ N. (1998) - Trophic features of benthic communities in the northern Adriatic Sea. *Biol. Mar. Medit.*, **5** (1): 136-143.
- ARDIZZONE G.D. (1992) - Cartografia bentonica con sistemi video controllati a distanza. *Oebalia*, **17** (2) suppl.: 441-452.
- ARDIZZONE G.D. (2000) - La rappresentazione cartografica nelle ricerche di biologia marina in Mediterraneo. *Biol. Mar. Medit.*, **7** (1): 461-477.
- ARDIZZONE G.D., AGNESI S., BIAGI F., BAINO R., CORSI F. (2000) - Geographical Information Systems and Surplus Production Models: A new model for spatial assessment of demersal resources. In: *Demersal resources in the Mediterranean*, IFREMER, **26**: 97-111.
- ARDIZZONE G.D., CORSI F., AGNESI S. (1999) - *Atlante delle risorse ittiche demersali dei mari italiani. Triennio 1994-1996*. Ministero per le Politiche Agricole, Roma: 1 CD-ROM.
- ARDIZZONE G.D., LA MONICA G.B., RAFFI R. (1996) - Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di *Posidonia oceanica*. I. Lazio settentrionale; II. Lazio centrale; III. Lazio meridionale. In: *Il mare del Lazio*. Università di Roma "La Sapienza" - Regione Lazio.
- BALDUZZI A., BIANCHI C.N., CATTANEO-VIETTI R., CERRANO C., COCITO S., COTTA S., DEGL'INNOCENTI F., DIVIACCO G., MORGIGNI M., MORRI C., PANSINI M., SALVATORI L., SENES L., SGORBINI S., TUNESI L. (1994) - Primi lineamenti di bionomia bentica dell'isola Gallinaria (Mar Ligure). In: Albertelli G., Cattaneo-Vietti R., Piccazzo M. (eds), *Atti*

- del 10° Congresso della Associazione italiana di Oceanologia e Limnologia. AIOL, Genova: 603-617.
- BARTLETT D.J. (2000) - Working on the frontiers of science: applying GIS to the coastal zone. In: Wright G., Bartlett D.J. (eds), *Marine and coastal geographical information systems*, Taylor & Francis, Philadelphia, Pennsylvania: 11-24.
- BELLAN G. (1991) - Characteristic, indicative and sentinel species: from the conception to the utilization. In: Ravera O. (ed), *Terrestrial and aquatic ecosystems*. Ellis Horwood Ltd, Chichester: 95-100.
- BERTRAND J.A., GIL DE SOLA L., PAPAConstantinou C., RELINI G., SOUPLET A. (2002) - The general specifications of the MEDITS surveys. *Sci. Mar.*, **66** (Suppl. 2): 9-17.
- BIANCHI C.N. (1991) - Elementi di bionomia bentica. In: Abbiati M. (ed), *Lezioni del corso formativo per ricercatore scientifico subacqueo*. International School for Scientific Diving, Pisa: 39-65.
- BIANCHI C.N., CINELLI F., MORRI C. (1996) - La carta bionomica dei mari toscani: introduzione, criteri informativi e note esplicative. *Atti Soc. toscana Sci. nat., Mem.*, ser. A, **102** suppl. (1995): 255-270.
- BIANCHI C.N., COCITO S., MORRI C., SGORBINI S. (1991) - Rilevamento bionomico subacqueo. In: Abbiati M. (ed), *Lezioni del corso formativo per ricercatore scientifico subacqueo*. International School for Scientific Diving, Pisa: 67-83.
- BIANCHI C.N., MORRI C. (1989) - Carta delle maggiori biocenosi marine bentiche delle coste pugliesi. Allegata a: *Thalassia Salentina*, **18** (1988). Lecce, 1991.
- BIANCHI C.N., MORRI C. (2001) - L'approccio bionomico per la caratterizzazione e la zonazione dell'ambiente marino costiero: una rassegna introduttiva. *Atti Assoc. ital. Oceanol. Limnol.*, **14**: 401-434.
- BIANCHI C.N., PEIRANO A. (1995) - Atlante delle fanerogame marine della Liguria: *Posidonia oceanica* e *Cymodocea nodosa*. ENEA, Centro Ricerche Ambiente Marino, La Spezia.
- BIANCHI C.N., SGORBINI S., ZURLINI G. (1985) - Essai de cartographie benthique du golfe de Gaète (Mer Tyrrhénienne, Italie) à l'aide de la «trend-surface analysis». *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, **29** (6): 221-226.
- BIANCHI C.N., ZURLINI G. (1984) - Criteri e prospettive di una classificazione ecotipologica dei sistemi marini costieri italiani. *Acqua Aria*, **8**: 785-796.
- BLONDEL P., MURTON B.J. (1997) - *Handbook of seafloor sonar imagery*. John Wiley and Sons, Chichester: 336 pp.
- BRUNO R., RASPA G. (1994) - *La pratica della geostatistica lineare. Il trattamento dei dati spaziali*. A. Guerini & Associati, Milano: 170 pp.
- CANTONE G., MOLLICA E., RUSSO G.F. (2000) - Il benthos di fondo mobile del Golfo di Noto: cartografia con tecniche di interpolazione su mappa. *Biol. Mar. Medit.*, **7** (1): 583-587.
- CINELLI F., FRESI E., LORENZI C., OREL G., CALVO S., COSSU A., MATRICARDI G., COLANTONI P., PEIRANO A., BIANCHI C.N., MAZZELLA L., NASCETTI D., GIANNETTI P., MAMMUCARI G., MUCEDOLA A. (1995) - Proposta di accordo sui parametri cartografici relativi alle aree del Mediterraneo caratterizzate da biocenosi bentoniche costiere. *Riv. marit.*, suppl. **12**: 250-271.
- COLANTONI P. (1980) - *La scienza subacquea. Le moderne tecniche d'immersione e ricerca subacquea*. La Cuba, Roma: 157 pp.
- COLANTONI P. (1999) - Note sulla cartografia italiana. In: Abbiati M. (ed), *Lezioni del corso formativo per ricercatore scientifico subacqueo*. International School for Scientific Diving, Pisa (2ª edizione): 41-46.
- COLANTONI P., GALLIGNANI P., FRESI E., CINELLI F. (1982) - Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds around the Island of Ischia (Gulf of Naples) and in adjacent waters. *P.S.Z.N.I.: Mar. Ecol.*, **3** (1): 53-74.
- CORSI F., AGNESI S., SCHINTU P., ARDIZZONE G. D. (1998) - Geographical Information System (GIS) applied to fisheries data: the case of Italian demersal resources. *Cah. Opt. médit.*, **35**: 155-168.
- DE BIASI A.M., GAI F. (2000) - I "catini" delle Secche della Meloria: carta dei fondali. *Atti Soc. toscana Sci. nat., Mem.*, ser. B, **107**: 63-69.
- DE FALCO G., MURRU E., BAROLI M., PIERGALLINI G., CANCEMI G. (2000) - Photo-aerial image processing and sediment analysis as indicators of environmental impact on *Posidonia oceanica* in the Mediterranean. *Biol. Mar. Medit.*, **7** (2): 349-352.

- ENGLISH S., WILKINSON C., BAKER V. (eds) (1997) - *Survey manual for tropical marine resources*. Australian Institute of Marine Science, Townsville (2ª edizione): 390 pp.
- FISH J.P., CARR H.A. (1991) - *Sound underwater images: a guide to the generation and interpretation of side scan sonar data*. Lower Cape Publishing, Orleans: 195 pp.
- FLEMMING N.C., MAX M.D. (1996) - *Scientific diving: a general code of practice*. Best Publishing Company, Flagstaff, Arizona, e Unesco, Paris: 278 pp.
- GAMULIN-BRIDA H. (1967) - The benthic fauna of the Adriatic Sea. *Oceanogr. mar. Biol. ann. Rev.*, **5**: 535-568.
- GILI J.M., ZABALA M., ROS J.D., OLIVELLA I., BALLESTEROS E. (1984) - *Cartografia bionomica de les Illes Medes*. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.
- HOLME N.A., MCINTYRE A.D. (1984) - *Methods for the study of marine benthos*. IBP Handbook 16, Blackwell Sci., Oxford (2<sup>nd</sup> edition): 387 pp.
- KINGSFORD M., BATTERSHILL C. (1998) - *Studying temperate marine environments. A handbook for ecologists*. Canterbury University Press, Christchurch, New Zealand: 344 pp.
- MARION A.F. (1883) - Esquisse d'une topographie zoologique du golfe de Marseille. *Ann. Mus. Hist. nat. Marseille*, **1**: 6-108.
- MÉAILLE R., WALD L., BOUDOURESQUE C.F. (1988) - Cartes des peuplements benthiques en Méditerranée: constitution d'une banque de données géocodées et synthèse cartographique. *Oceanol. Acta*, **11** (2): 201-211.
- MEINESZ A. (1985) - Travaux présentés lors d'une séance interdisciplinaire sur la cartographie biologique: méthodes et exploitation. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, **29** (6): 193-248.
- MEINESZ A., BELSHER T., BOUDOURESQUE C.F., LEFEVRE J.R. (1991) - Première évaluation des potentialités du satellite SPOT pour la cartographie des peuplements benthiques superficiels de Méditerranée Occidentale. *Oceanol. Acta*, **14**: 299-307.
- MEINESZ A., BOUDOURESQUE F., FALCONETTI C., ASTIER J.M., BAY D., BLANC J.J., BOURCIER M., CINELLI F., CIRIK S., CRISTIANI G., DI GERONIMO I., GIACCONE G., HARMELIN J.G., LAUBIER L., LOVRIC A.Z., MOLINIER R., SOYER J., VAMVAKAS C. (1983) - Normalization des symboles pour la représentation et la cartographie des biocénoses benthiques littorales de Méditerranée. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris, **59** (2): 155-172.
- MOLINIER R., PICARD J. (1960) - Délimitation et cartographie des peuplements marins benthiques de la mer Méditerranée. *Bull. Serv. Carte phytogéogr. C.N.R.S.*, sér. B, **4** (1): 73-84.
- MORRI C., BAVESTRELLO G., BIANCHI C.N. (1991) - Faunal and ecological notes on some benthic cnidarian species from the Tuscan Archipelago and eastern Ligurian Sea (western Mediterranean). *Boll. Mus. Ist. biol. Univ. Genova*, **54-55** (1988-1989): 27-47.
- MORRI C., BIANCHI C.N., DAMIANI V., PEIRANO A., ROMEO G., TUNESI L. (1986) - Carta delle biocenosi marine bentiche tra Punta della Chiappa e Sestri Levante (Mar Ligure). Allegata a: *Boll. Mus. Ist. biol. Univ. Genova*, **52**, suppl. (1986). Genova, 1988.
- MUCEDOLA A. (1999) - Introduzione alla cartografia e alla geodesia. In: Abbiati M. (ed), *Lezioni del corso formativo per ricercatore scientifico subacqueo*. International School for Scientific Diving, Pisa (2ª edizione): 17-40.
- NAVONE A., BIANCHI C.N. (1992) - Riserva marina di Tavolara - Capo Coda Cavallo (Sardegna NE). Carta bionomica dei fondi marini. Studio Navone, Olbia.
- NAVONE A., BIANCHI C.N., ORRÙ P., ULZEGA A. (1992) - Saggio di cartografia geomorfologica e bionomica nel parco marino di Tavolara - Capo Coda Cavallo. *Oebalia*, **17** (2) suppl.: 469-478.
- N.O.A.A. (2001) - NOAA coastal change analysis program (C-CAP): guidance for regional implementation. NOAA Technical Report NMFS 123. Department of Commerce. Washington D.C.
- N.O.A.A. (2002) - NOAA diving manual: diving for science and technology, 4<sup>th</sup> edition. NTIS, Department of Commerce. Washington D.C. (4ª edizione).
- OREL G., MAROCCO R., VIO E., DEL PIERO D., DELLA SETA G. (1987) - Sedimenti e biocenosi bentoniche tra la foce del Po ed il Golfo di Trieste (Alto Adriatico). *Bull. Ecol.*, **18** (2): 229-241.
- PAILLARD M., GRAVEZ V., CLABAUT P., WALKER P., BLANC J.J., BOUDOURESQUE C.F., BELSHER T., URSCHER F., POYDENOT F., SINNASSAMY J.M., AUGRIS C., PEYRON-

- NET J.P., KESSLER M., AUGUSTIN J.M., LE DREZEN E., PRUDHOMME C., RAILLARD J.M., PERGENT G., HOAREAU A., CHARBONNEL E. (1993) - Cartographie de l'herbier de posidonies et des fonds marins environnants de Toulon à Hyères (Var-France). Reconnaissance par sonar latéral et photographie aérienne. Notice de présentation. IFREMER & GIS Posidonie.
- PARENZAN P. (1983) - Carte biocenotiche dei mari pugliesi. Allegate a: *Puglia marittima*. Congedo Editore, Galatina (Lecce), volume secondo, 10 tavole (A-L).
- PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., CLABAUT P., PERGENT G. (1998) - Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar: application off the Island of Corse (France). *Est. coast. Shelf Sci.*, **47**: 359-367.
- PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., FERNANDEZ C., PERGENT G. (1997) - The use of airborne remote sensing for benthic cartography: advantages and reliability. *Int. J. rem. Sens.*, **18** (5): 1167-1177.
- PÉRES J.M., PICARD J. (1964) - Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée. *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, **31** (47): 1-137.
- PICARD J. (1965) - Recherches qualitatives sur les biocoenoses marines des substrats meubles dragables de la région marseillaise. *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, **36** (52): 1-160.
- RELINI G. (1998) - Valutazione delle risorse demersali. *Biol. Mar. Medit.*, **5** (3): 3-19.
- ROBINSON C.L.K., HAY D.E., BOOTH J., TRUSCOTT J. (1996) - Standard methods for sampling resources and habitats in coastal subtidal regions of British Columbia: Part 2: Review of sampling with preliminary recommendations. *Canadian techn. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, **40**: 1-120.
- SANTOS A.M. (2000) - Fisheries oceanography using satellite and airborne remote sensing methods: a review. *Fish. Res.*, **49**: 1-20.
- SCARDI M., FRESI E., ARDIZZONE G.D. (1989) - Cartographic representation of sea-grass beds: application of a stochastic interpolation technique (kriging). In: Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. (eds), *2<sup>nd</sup> International workshop on Posidonia beds*. GIS Posidonie, Fr. **2**: 19-27.
- SGORBINI S., PEIRANO A., COCITO S., MORGIGNI M. (2002) - An underwater tracking system for mapping marine communities: an application to *Posidonia oceanica*. *Oceanol. Acta*, **25**: 135-138.
- SIGL W., VON RAD U., OELTZSCHNER H., BRAUNE K., FABRICIUS F. (1969) - Diving sled: a tool to increase the efficiency of underwater mapping by SCUBA. *Mar. Geol.*, **7**: 357-363.
- SOMASCHINI A., MARTINI N., GRAVINA M.F., BELLUSCIO A., CORSI F., ARDIZZONE G.D. (1998) - Characterization and cartography of some Mediterranean soft-bottom benthic communities (Ligurian Sea, Italy). *Sci. mar.*, **62** (1-2): 27-36.
- TUNESI L., PICCIONE M.E., AGNESI S. (2002) - Progetto pilota di cartografia bionomica dell'ambiente marino costiero della Liguria. Proposta di un Sistema Informativo Geografico per la gestione di cartografie bionomiche e sedimentologiche. *Quaderno ICRAM*, **2**: 112 pp.
- VATOVA A. (1949) - La fauna bentonica dell'Alto e Medio Adriatico. *Nova Thal.*, **1** (3): 1-110.
- VILLA F., TUNESI L., AGARDY T. (2002) - Optimal zoning of marine protected areas through spatial multiple criteria analysis: the case of the Asinara Island National Marine Reserve of Italy. *Cons. Biol.*, **16** (2): 1-12.