

## Studio del trasporto sedimentario su spiagge a granulometria mista tramite traccianti fluorescenti: applicazioni a Porto Recanati (MC)

Emanuele Castiglione, Paolo Ciavola e Simone Caleffi

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara.  
Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara. Tel. +39-0532-974739, E-mail: cstmn1@unife.it

### Riassunto

In questo lavoro si presentano i risultati di un esperimento per lo studio del trasporto di sabbie effettuato su una spiaggia di Porto Recanati (MC), attraverso l'utilizzo di traccianti fluorescenti, di rilievi topografici di precisione e di campionamenti granulometrici.

L'obiettivo principale di questo esperimento era quello di capire le direzioni del trasporto sedimentario su di una spiaggia sita vicino una foce fluviale, che ha la particolarità di essere di tipo "misto" da un punto di vista granulometrico, cioè costituita da sabbia e ghiaia. Tale tipologia di spiaggia è caratterizzata da una forte variabilità granulometrica con frequenti cambiamenti anche orari.

La spiaggia in questione presenta una pendenza molto elevata che permette di classificarla come "riflettente" con un gradino di battigia molto accentuato.

L'esperimento si è svolto con condizioni meteomarine di alta energia, generate da venti predominanti da S-E. Le condizioni "estreme" dell'esperimento hanno permesso di quantificare solo in parte i valori di trasporto litoraneo, poiché la velocità di deriva lungocosta è risultata molto elevata e di conseguenza si è assistito ad una rapida diluizione della massa di sedimento tracciante, diminuendo la quantità di tracciante recuperato. Si è quindi deciso di non considerare dati con percentuale di recupero del tracciante inferiore a 60%. Dallo studio dell'evoluzione morfologica e della distribuzione granulometrica si sono ricostruite le direzioni di migrazione del materiale iniettato, che si è in parte spostato lungocosta ed in parte ortogonalmente, differenziandosi in base alla granulometria. Si è notato infatti come, in condizioni di alta energia, la frazione ghiaiosa tenda a concentrarsi alla base della battigia, mentre la sabbia si distribuisce sulla parte alta della spiaggia.

Si è anche notato che nei periodi meno energetici sulla spiaggia venivano a formarsi accumuli ciottolosi che non erano presenti al momento dei campionamenti pre-esperimento. Esperimenti futuri si concentreranno sul trasporto di questa classe granulometrica.

**Parole chiave:** traccianti fluorescenti, Adriatico, sedimenti costieri, Marche, spiaggia mista.

### Abstract

*This paper presents the results obtained from a field experiment focused on sand and gravel transport on a microtidal beach. The work was carried out through the use of fluorescent tracers, accurate topographic surveys and granulometric samples.*

*The target of the experiment was to understand the directions of sediment transport on a beach close to a river mouth, with the main characteristic of a mixed granulometry consisting of sand and pebbles. This kind of beach is characterized by a strong variability affecting the grain size, with possible hourly variations.*

*The studied beach presents a marked steepness, so that it is possible to classify it as a reflective beach with a well defined beach-step.*

*The experiment was carried during high energy wave conditions, generated by predominant South-East winds typical of this area (Sirocco). The “extreme” conditions observed during the experiment (compared to the Adriatic wave climate) partly permitted to quantify the long-shore transport rate; due to high long-shore current velocities, the tracer concentration decreased rapidly, permitting only a partial recovery the initial tracer mass. Because of the fast dilution, data with a recovery percentage lower than 60% had not been considered.*

*Studying the morphologic evolution and the granulometric distribution, the spreading pathways of the injected material were reconstructed, showing partly a long-shore and partly a cross-shore sediment movement, differentiated as a function of sediment size. The results of the work outline how, in high energy conditions, the pebble fraction tends to settle in the deepest part of the swash-zone, while the sand tends to move towards the upper part of the swash.*

*It has also been noticed that during low energy conditions, pebble deposits, not seen at the beginning of field work, were created.*

*Future works will investigate the role of this particular size fraction on the long and cross-shore sediment transport.*

**Keywords:** *fluorescent tracers, Adriatic, coastal sediments, Marche, mixed granulometry.*

### **Premessa**

Fin dagli albori della ricerca sul trasporto sedimentario, la sperimentazione sulla dinamica del trasporto lungocosta si è resa conto del potenziale che può avere il materiale reso “identificabile” tramite colorazione artificiale o irraggiamento radioattivo. I traccianti artificiali sono essenzialmente granuli che possono essere identificati all’interno di volumi di sedimento di cui sono considerati rappresentativi. Nonostante il concetto sia qualitativamente simile ai traccianti mineralogici (ad es. minerali pesanti), l’uso dei traccianti artificiali mira a studi di tipo quantitativo.

Nonostante gli ultimi 20 anni di ricerca sul trasporto di sedimenti siano stati caratterizzati dallo sviluppo di sensori ottici ed acustici per la quantificazione delle concentrazioni di sedimento sospeso, il metodo dei traccianti rimane l’unica tecnica che può essere applicata essenzialmente a qualunque scala spaziale e temporale. Del resto buona parte degli studi di calibrazione delle formule per il trasporto dei sedimenti hanno utilizzato traccianti fluorescenti. Il più famoso è forse quello di Komar e Inman (1970), che ha calibrato la formula per il calcolo del trasporto lungocosta in funzione del flusso di energia, comunemente nota come “formula del CERC”, contenuta nel Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2006). La tecnica di colorare sabbie con vernice fluorescente è probabilmente nata in Russia alla fine degli anni ’50 (Zenkovith, 1960) ed inizialmente utilizzava delle colle contenenti pigmenti fluorescenti. Risale però al lavoro di Ingle nel 1966 il primo “manuale” sulla colorazione utilizzando vernici. Negli anni ’70 venne tentato il più grande esperimento sinora conosciuto da Chapman e Smith (1977) sulla Gold Coast, in Australia. In quel caso si pensò di iniettare la sabbia utilizzando una draga, che stava svolgendo delle operazioni di ripascimento.

Il metodo ha incontrato una nuova popolarità verso la metà degli anni ’90, con un gruppo di ricercatori in Portogallo che hanno standardizzato la colorazione ed il campionamento successivo all’iniezione (Ciavola et al., 1997a; 1998). Nonostante inizialmente il metodo sia stato sperimentato soprattutto su spiagge rettilinee, gli stessi ricercatori lo hanno in seguito applicato a varie situazioni, dai canali tidali tra isole barriera (Vila-Concejo et al. 2004) allo studio dell’interramento di canali di accesso portuale (Vila-Concejo et al., 2003). Uno degli ultimi lavori degni di nota, ove l’impiego dei traccianti fluorescenti viene associato all’uso di sensori OBS e di trappole sedimentarie, è sicuramente quello di Tonk e Masselink (2005) sulle coste dell’Australia. I metodi per quantificare il trasporto attraverso un’esperienza con traccianti sono vari. Il primo ad essere applicato è stato quello **dell’integrazione spaziale (SIM)**, usato ad esempio, da Komar ed Inman (1970); in questo caso i campioni vengono raccolti su di una maglia prestabilita, in modo da poter determinare la concentrazione dei traccianti in ogni campione e disegnare così una mappa di dispersione. Per quanto riguarda tale tecnica è di particolare importanza l’individuazione della profondità di rimescolamento, detta anche *mixing depth* (spessore interessato dal moto ondoso e alle correnti in periodi di ore), o di quella di rimobilizzazione, *disturbance depth* (considera anche l’erosione o la sedimentazione e quindi si riferisce ad un ciclo mareale o ad un evento di tempesta) (Eliot e Clarke, 1988). Per ulteriori dettagli su questi parametri, le loro relazioni con il moto ondoso e le caratteristiche della spiaggia si rimanda a studi precedenti (Kraus 1985; Ciavola et al., 1997b; Ferreira et al., 2000; Gonzalez et al., 2004; Anfuso, 2005). Per determinare la *mixing depth*, durante

la bassa marea si inseriscono dei *rods* (aste di misurazione, generalmente tondini in ferro o acciaio) nella sabbia. Queste aste metalliche vengono associate ad una rondella (Greenwood e Hale, 1980) che si muove verso il basso, assestandosi sulla nuova superficie della spiaggia; lo spessore della sabbia che si è depositata sulla rondella è la profondità di rimobilizzazione (Fig. 1). Nel caso ci sia solo sedimentazione la rondella si trova sempre alla stessa altezza iniziale ma si osserva sedimento al di sopra.

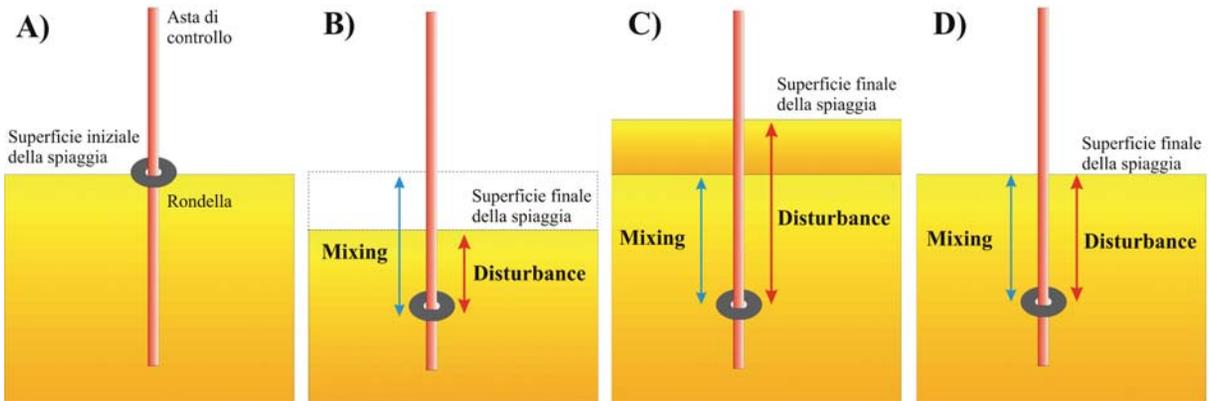


Figura 1 - *Disturbance e mixing depth*: A) situazione iniziale; B) erosione; C) sedimentazione; D) fondo in equilibrio.

Un altro metodo è quello della ‘integrazione temporale’ (TIM), usato per la prima volta da Kraus et al. (1982). Secondo questo metodo i campioni vengono raccolti sempre nello stesso punto, con un intervallo di 15 minuti per un periodo di 3-5 ore, con l’obiettivo di stabilire in che momento si abbia il passaggio della massima concentrazione di sedimento colorato. Si ricorda che anche per questo metodo è fondamentale conoscere la profondità di *mixing*.

Il terzo metodo è quello della ‘diluizione’, utilizzato per primo da Russell (1960), che consiste nell’inserimento continuo di traccianti in un punto e nello stabilire la sua concentrazione ad una determinata distanza dal punto di iniezione. L’equilibrio nella concentrazione dei traccianti dipenderà dalla capacità di diluizione del trasporto litorale e questo fornirà una media del trasporto. Il problema di questa tecnica sta nella gran quantità di traccianti che bisogna utilizzare per raggiungere l’equilibrio, anche se ha il vantaggio di non dover conoscere la profondità di *mixing*.

Vi è inoltre la possibilità di utilizzare simultaneamente traccianti di diversi colori iniettandoli in punti diversi oppure colorando diversamente varie granulometrie per capire il comportamento di ognuna di esse. Le problematiche più frequenti e difficili da risolvere nell’uso dei traccianti fluorescenti sono la resistenza all’abrasione del colore e la difficoltà di campionamento in cattive condizioni meteomarine, soprattutto in spiagge con una escursione mareale bassa.

La spiaggia di Porto Recanati ha caratteristiche sedimentologiche molto diverse da tutte quelle ove altri autori hanno svolto studi con traccianti, trattandosi di una spiaggia mista di sabbia e ghiaia, che presenta quindi un’elevata variabilità granulometrica a livello spaziale e temporale.

Da studi morfologici effettuati da altri autori su spiagge di questo tipo, emerge che la presenza della frazione più grossolana si fa più importante sulla spiaggia emersa in periodi di bassa energia del moto ondoso. Esiste una relazione di tipo inverso tra la presenza di ghiaia/ciottoli ed energia delle onde (Ekwurzel, 1988). A periodi alto-energetici invernali si associano piccole quantità di sedimento grossolano che, al contrario, si accumulano in grandi quantità durante l’estate. Ekwurzel (1988) aveva inoltre notato che nei periodi basso-energetici la dimensione media dei grani aumentava muovendosi dalla parte alta della spiaggia verso la zona di battigia. Secondo Nordstrom e Jackson (1993) durante le mareggiate il sedimento grossolano viene eroso dalla spiaggia emersa e trasportato al piede della battigia. Nelle fasi immediatamente successive alle mareggiate, il recupero del profilo di spiaggia avviene tramite deposizione della frazione sabbiosa in battigia, con formazione della berma. Successivamente, con il persistere di condizioni di bassa energia, tornano a depositarsi le frazioni più grossolane (ghiaia e ciottoli).

Con questo studio si voleva esaminare la differenziazione granulometrica, su una spiaggia caratterizzata da materiale eterogeneo, al variare delle condizioni energetiche. Nell'esperimento oggetto di questo lavoro si sono analizzate solo le granulometrie comprese tra la sabbia e la ghiaia, poiché la frazione ciottolosa è apparsa sulla spiaggia solo nelle fasi finali dell'esperimento.

### Sito di studio

Il sito oggetto dello studio (Fig. 2), è costituito da un breve tratto di litorale (circa 1 km) in prossimità della foce del fiume Potenza, nel comune di Porto Recanati, in provincia di Macerata. Il tratto di costa in questione presenta una dinamica costiera molto attiva, testimoniata da processi di erosione della linea di riva e da una granulometria varia e poco uniforme che permette di classificare questa spiaggia tra quelle di tipo misto. I principali bacini che forniscono un apporto di sedimento a questo tratto di litorale sono il fiume Potenza ed in minor quantità il fiume Musone, che è però situato diversi chilometri più a nord della spiaggia in questione. Secondo i dati raccolti dalla Regione Marche nell'ambito del Piano di Difesa della Costa ([www.autoritabacino.marche.it](http://www.autoritabacino.marche.it)), la spiaggia a sud dell'abitato di Porto Recanati è composta mediamente da un 23% di sabbia, un 12% di sabbia ghiaiosa, un 17% di ghiaia sabbiosa ed un 48% di ghiaia.

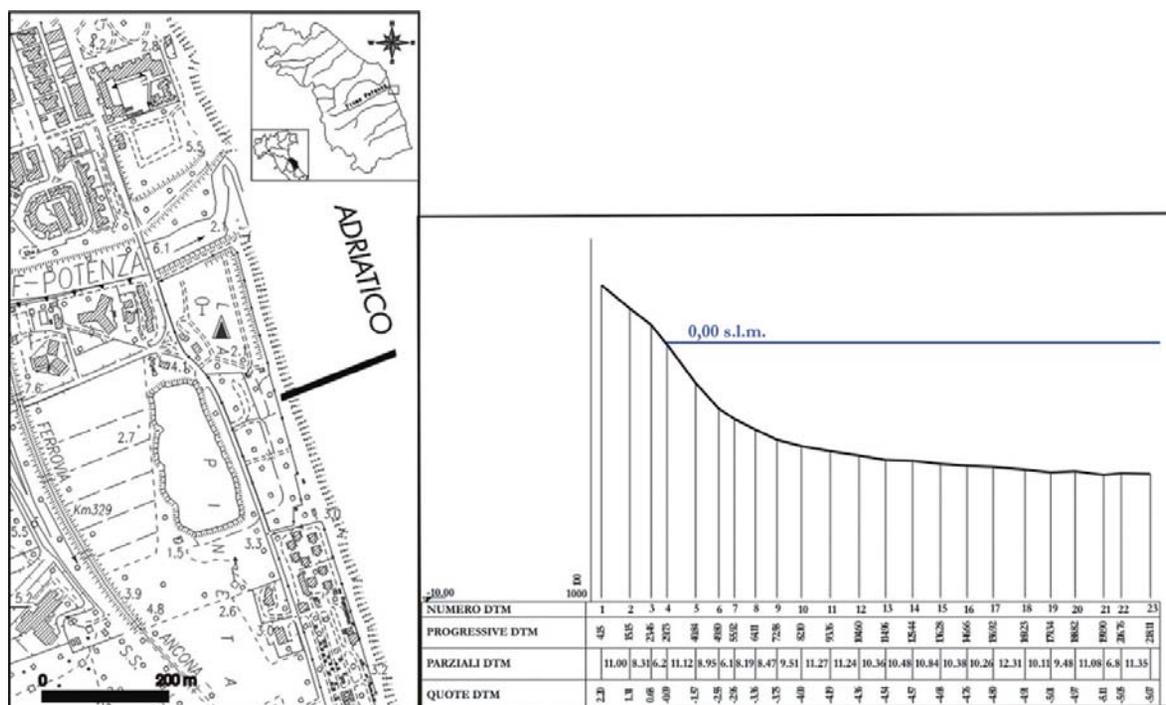


Figura 2 - Area di studio e profilo topo-batimetrico della parte centrale della zona di studio, effettuato dalla Regione Marche nel mese di luglio 2005.

Su questa spiaggia, dal dopoguerra ad oggi, si è instaurato un consistente deficit di sedimento dovuto alla drastica diminuzione del trasporto solido di fondo da parte del fiume, avvenuta dopo il 1960. La diminuzione del trasporto solido è da porre in relazione con l'enorme sviluppo delle attività antropiche nella zona d'alveo, come ad esempio le cave di estrazione della sabbia, fenomeno che ha interessato buona parte dei litorali italiani nel dopoguerra e che nelle Marche sono state vietate con una legge regionale del 1976.

### Materiali e metodi

Per questo esperimento si è deciso di utilizzare una spaziatura di 50 metri tra i profili di campionamento, che sono stati numerati partendo dal punto di iniezione (Pr0). Si è aggiunta una N al numero del profilo per quelli posti a nord ed una S per quelli a sud. Su ogni profilo si ha una spaziatura di 2.5 metri tra i punti campionati sulla spiaggia emersa.

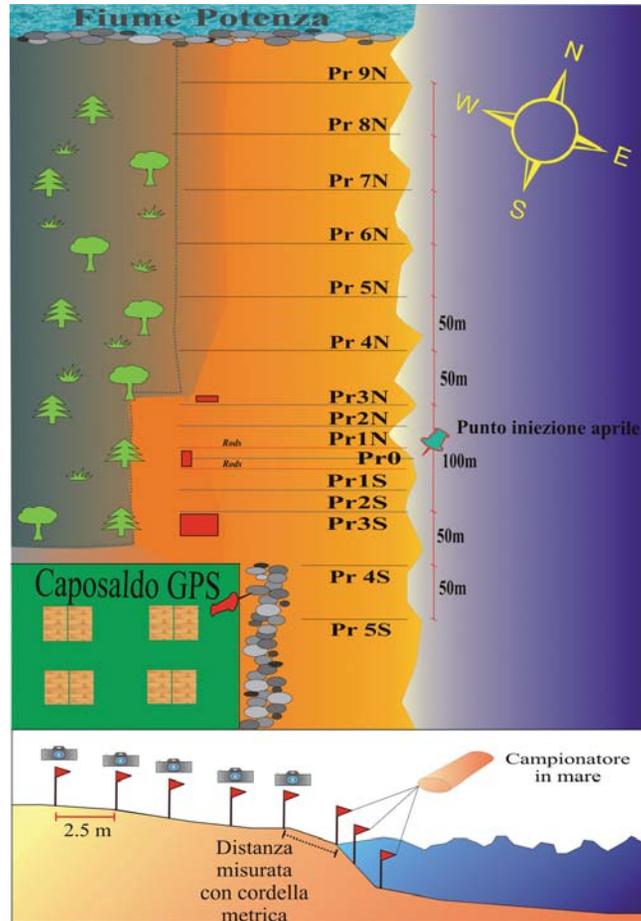


Figura 3 - Ubicazione e denominazione dei profili stabiliti per il monitoraggio dello spostamento del tracciante, dei rods e del punto di iniezione. Nella parte bassa della figura si evidenziano la posizione dei campioni e la tecnica di campionamento impiegata lungo ciascun profilo.

I campioni sulla spiaggia emersa sono stati posizionati tramite DGPS, quelli a mare tramite cordella metrica estesa dall'ultimo punto rilevato tramite DGPS (Fig. 3). Sono stati inoltre inserite due file di rods lungo i profili Pr1N e Pr1S. La distanza tra un rod ed il successivo era di 2.5 metri (Fig. 3).

### *Traccianti fluorescenti*

Per la procedura di marcatura del sedimento, ci sono vari tipi di resine e colori che possono essere utilizzati. Il requisito principale per il colore è quello di essere resistente all'abrasione chimica e meccanica causata dall'acqua di mare. Inizialmente, sostanze come agar (colla di alga), colla d'ossa, gomma e amido erano impiegati come legante (Zenkovitch, 1960), mentre in seguito si è passato a colori acrilici, che offrono una migliore resistenza all'abrasione (Yasso, 1966). Vari studi in ambiente Atlantico ed Adriatico hanno identificato nelle vernici fluorescenti solubili in toluene il miglior compromesso tra resistenza all'abrasione e costo (Taborda et al., 1994; Ciavola et al., 1997a; Ciavola et al., 1998, Ciavola et al., 2005). Questi ultimi autori hanno delineato una metodologia standardizzata per la preparazione del tracciante tramite l'uso di una piccola betoniera da cantiere e l'immissione della vernice estremamente diluita. In seguito la sabbia viene lasciata in betoniera, che continua a ruotare, finché il colore è prossimo all'asciugatura. È stato trovato che, in questo modo, il colore forma un sottile strato intorno al granulo e, soprattutto, si diminuisce la percentuale di materiale aggregato, specialmente se la sabbia viene essiccata rapidamente all'aria aperta e sotto il sole. Qualora piccoli aggregati siano presenti, la sabbia può essere setacciata con maglie appropriate, in modo da non alterare la similitudine tra la popolazione granulometrica nativa e quella del tracciante. Va infine ram-

mentata la necessità di utilizzare vernice ad alta fluorescenza in seguito ad esposizione sotto luce UV. La giustificazione nasce dall'esigenza di poter identificare i grani colorati una volta dispersi all'interno della massa di sedimento con colorazione naturale.

Va fatto notare che gli studi citati sopra avevano utilizzato sedimenti di spiaggia con granulometria massima corrispondente alla sabbia media, provenienti da popolazioni granulometriche ben cernite ed essenzialmente unimodali. Poiché le popolazioni granulometriche del sedimento della spiaggia in questione presentano un'elevata quantità di ghiaia, si è deciso di testare separatamente il metodo di colorazione sulla frazione ghiaiosa da quella sabbiosa.

Per lo svolgimento del test di colorazione qui descritto, si è utilizzata una piccola betoniera elettrica con la quale si coloravano non più di 20-30 kg di sedimento per volta. Si decideva di colorare la parte con granulometria inferiore ai 2 mm con vernice verde e quella con granulometria superiore con vernice rossa, eseguendo la separazione delle due frazioni granulometriche mediante vagliatura.

Le vernici scelte erano a base acrilica con pigmenti fluorescenti, ossia in grado di rimettere immediatamente la luce assorbita. Si sono effettuate diverse prove per ottenere il rapporto ottimale tra vernice e diluente (toluene), in quanto all'aumentare della granulometria si ha una diminuzione della superficie specifica e quindi bisogna ridurre la quantità di colore in modo da non creare un composto troppo denso e facilmente raggrumante.

Si è deciso di iniettare per l'esperimento un quantitativo di sabbia colorata pari a 200 kg. È importante ricordare che il sedimento colorato deve essere accuratamente lavato con acqua ed una piccola dose di sapone prima di essere iniettato, per evitare che tenda a formare grumi o a galleggiare in superficie. In campagna veniva utilizzata la tecnica dell'iniezione puntuale e del campionamento tramite integrazione spaziale (SIM). Lo studio della dispersione veniva effettuato utilizzando una camera ad ultravioletti portatile, montata su un quad (Fig. 4).

Il conteggio dei grani traccianti veniva effettuato *in-situ*, permettendo quindi di ottimizzare la spaziatura delle griglie di campionamento. Per il conteggio automatizzato dei granelli di sabbia fluorescente presenti all'interno delle immagini veniva elaborata una routine in ambiente Matlab, con calibrazione dell'algoritmo di detezione in laboratorio, considerando il possibile effetto della perdita di colore superficiale in seguito ad abrasione.

L'intera gamma dei colori è funzione della combinazione dei valori RGB, sono perciò possibili  $256^3$  sfumature diverse, per un totale di oltre 16 milioni di colori (le immagini RGB vengono anche definite *true color*).



**Figura 4 - Camera UV portatile montata sul veicolo utilizzato.**

Se la fotografia viene scattata sotto una fonte di luce UV, grazie allo sfondo dell'immagine molto scuro, occupato da granelli di sabbia normale non fluorescenti, i grani verniciati risaltano chiaramente rispetto al resto dell'immagine (Fig. 6).

I colori delle vernici fluorescenti utilizzate per l'esperimento vengono individuati attraverso il processamento di ogni pixel dell'immagine, considerando il variare dei tre valori RGB all'interno di range specifici validi per il riconoscimento.

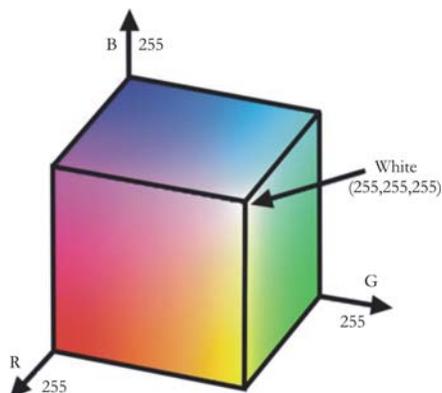


Figura 5 - Visualizzazione tridimensionale dell'intera gamma di colori RGB (modificato da guida Matlab).



Figura 6 - Ingrandimento di una immagine UV con presenza di granelli colorati.

Il principio su cui si fonda il riconoscimento dei granelli d'interesse si basa sulla scomposizione dell'immagine nelle sue tre matrici RGB e sull'analisi separata dei massimi relativi a ciascuna matrice.

Plottando separatamente, come una superficie, le tre matrici RGB (Fig. 7), si notano le variazioni dei singoli valori per ogni pixel, che combinati insieme restituiscono il colore presente nel pixel dell'immagine originale. L'algoritmo di detezione evidenzia quindi le zone con massimi relativi superiori a determinate soglie, controllando che nelle zone in questione siano verificati i range di appartenenza al colore delle vernici usate. Come controllo aggiuntivo le zone selezionate sull'immagine RGB vengono trasformate nel formato HSV (Hue, Saturation, Value) dove si procede ad un'ulteriore verifica della discriminazione svolta in banda RGB. Il risultato della routine fornisce, in matrici separate costituite da valori binari (Fig. 8), i gruppi di pixel che hanno superato l'analisi, calcolando il numero di granelli colorati e la rispettiva area. Questa viene infine rapportata all'area totale dell'immagine per ottenere una concentrazione superficiale del tracciante.

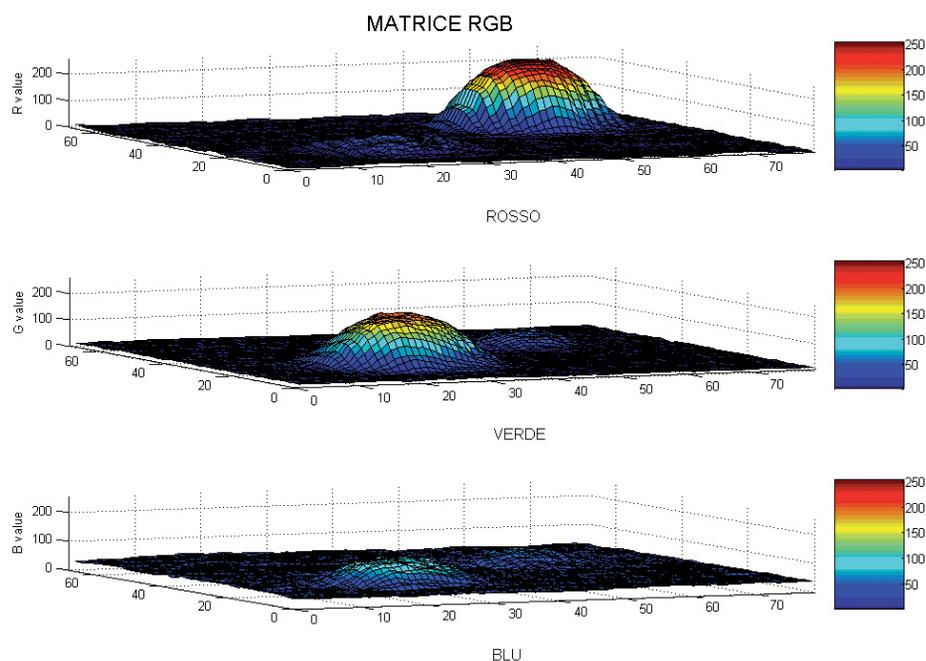


Figura 7 - Separazione della matrice RGB relativa alla foto in Figura 6.

### Assi di transito sedimentario

Come tentato precedentemente da Pedreros et al. (1996) per lo studio di barre intertidali, un'ulteriore conferma di risultati sulla dispersione del tracciante può provenire dall'applicazione di modelli statistici come quello di McLaren (1981), che prende in considerazione il fatto che, in un ambiente sedimentario, i parametri granulometrici variano lungo la direzione di trasporto netto. Questa variazione spaziale dei parametri dimensionali è controllata dalle caratteristiche della distribuzione granulometrica dell'area sorgente e dall'azione dei processi sedimentari come erosione, trasporto e deposizione selettiva e massiva (McLaren, 1981).

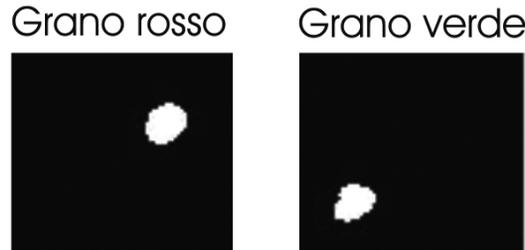
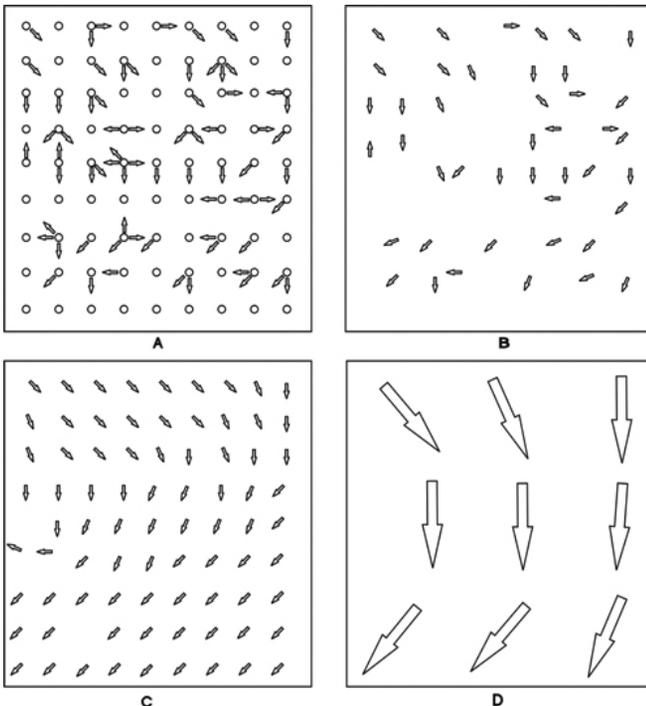


Figura 8 - Matrici binarie risultanti dalla routine per i due colori.

I principi proposti da McLaren (1981) si basano sulla comparazione delle variazioni fra i tre parametri sedimentologici più usati: la media ( $m_T$ ), la classazione ( $s_T$ ) e l'asimmetria ( $Sk_{T2}$ ). L'originalità di questo concetto risiede nell'utilizzo simultaneo di questi tre parametri statistici nella procedura di trattamento analitico dei dati, per mettere in evidenza le affinità tra i campioni prelevati e la loro espressione sotto forma di vettori di trasporto sedimentario (McLaren e Bowles, 1985; Lanckneus et al., 1992).

Quando una sorgente sedimentaria subisce erosione, ed il sedimento trasportato viene completamente depositato, tale deposito deve avere granulometria più fine, classazione migliore ed asimmetria più negativa rispetto alla sorgente. Se si ha un trasporto selettivo, anche la deposizione sarà selettiva ed il deposito risultante potrà essere più fine o più grossolano rispetto alla sorgente, ma la classazione sarà migliore e l'asimmetria più positiva. Le eccezioni a questi principi suggeriscono che non è possibile identificare un ambiente deposizionale o un processo sedimentario con una singola distribuzione granulometrica, ma che è necessario il confronto fra più distribuzioni (McLaren, 1981).



Gao e Collins (1991, 1992), sullo stesso principio di base hanno trasformato il carattere unidimensionale del metodo di McLaren in carattere bi-dimensionale (carattere lineare: i campioni sono infatti raccolti lungo una linea, come per esempio una spiaggia). Per conservare poi solo i casi significativi di un trasporto reale, gli stessi autori hanno utilizzato una tecnica semi-quantitativa di filtraggio del "rumore di fondo" (Fig. 9).

Si ottiene così, dall'insieme dei vettori trasporto, il 'modello residuale' del trasporto. Esso consiste nel selezionare le direzioni di trasporto più frequenti del modello iniziale, stabilite a partire dai vettori trasporto (Fig. 9d). Le tecniche di filtraggio hanno infatti permesso di scartare le direzioni poco frequenti (Gao e Collins, 1992).

Figura 9 - Procedura schematica del trattamento dei dati in 2D. a: vettori trasporto ottenuti dal calcolo statistico; b: vettori somma; c: operazione di filtraggio; d: definizione della direzione di trasporto (modificato da Gao e Collins, 1991).

Per applicare il modello di McLaren-Gao e Collins, è stato utilizzato il programma denominato "DERSEDI Version 2" (© Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine, SHOM, France).

Per applicare questo modello è stato necessario effettuare analisi granulometriche su 37 campioni raccolti in corrispondenza delle foto UV del 6 aprile 2006, mediante setacciatura ad 1/2 a secco. I dati granulometrici sono stati elaborati per la determinazione dei parametri statistici di Folk e Ward (1957): dimensione media, sorting, skewness.

## Risultati e Discussione

### Variazioni morfologiche

Dal rilievo topografico effettuato il 3 aprile 2006 si nota come la spiaggia tenda a restringersi verso la zona prossima alla foce del fiume (Fig. 10). Dai profili si vede la notevole pendenza (circa 11%) che inserisce questa spiagge tra quelle "riflettenti" secondo la classazione di Wright e Short (1984). Il 4 aprile 2006 sono state inserite due file di rods in corrispondenza dei profili Pr1-N e Pr1-S (Fig. 11).

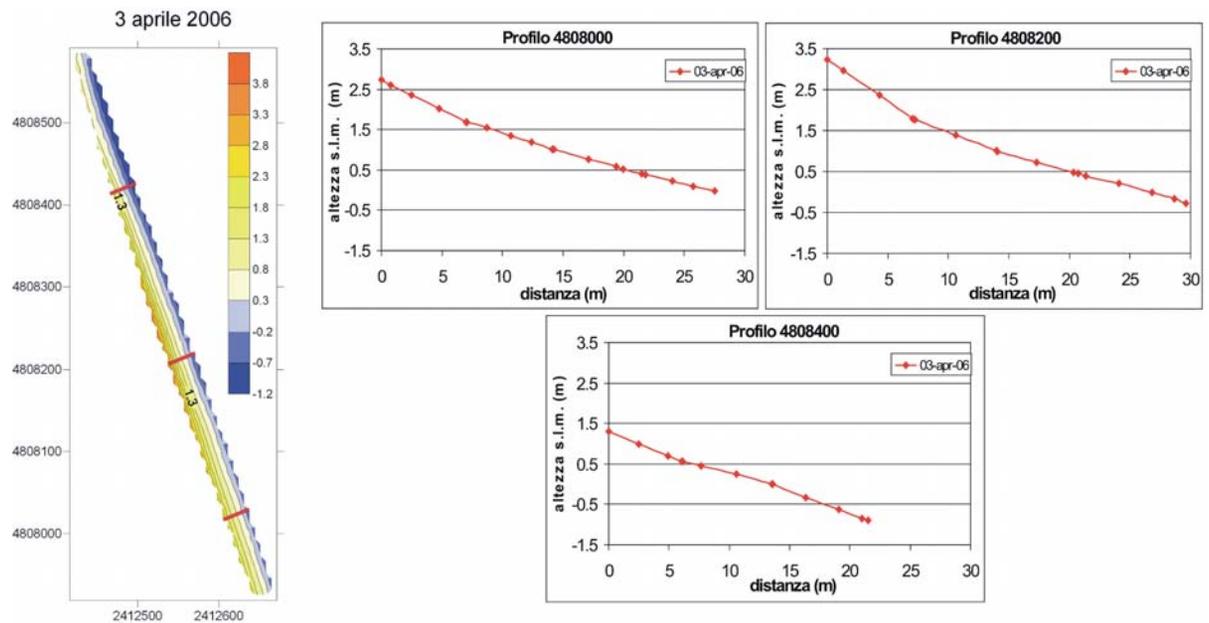


Figura 10 - Rilievo topografico del 3 aprile 2006.

Dai rods si è riusciti ad evidenziare che le profondità di mixing sulla battigia risultano assestarsi sempre sui 8-10 cm, mentre nella parte alta non superano mai i pochi millimetri (Fig. 12 e Tab. 1).

Andando ad analizzare i profili ottenuti dai rods si nota come, dopo 5 ore (ore 17 del 4 aprile) dall'inizio dell'acquisizione dei dati, si sia avuta una leggera accrezione sulla battigia a discapito della zona limitrofa topograficamente più alta, soprattutto lungo il profilo nord.

Questa tendenza sembra essere costante fino al rilievo delle ore 16:00 del 5 aprile 2006, dopo di che, a causa delle forti mareggiate da sud avutesi nelle ore precedenti, si nota come tutta la parte alta della spiaggia sia in forte erosione e che il sedimento va a depositarsi all'altezza della battigia.

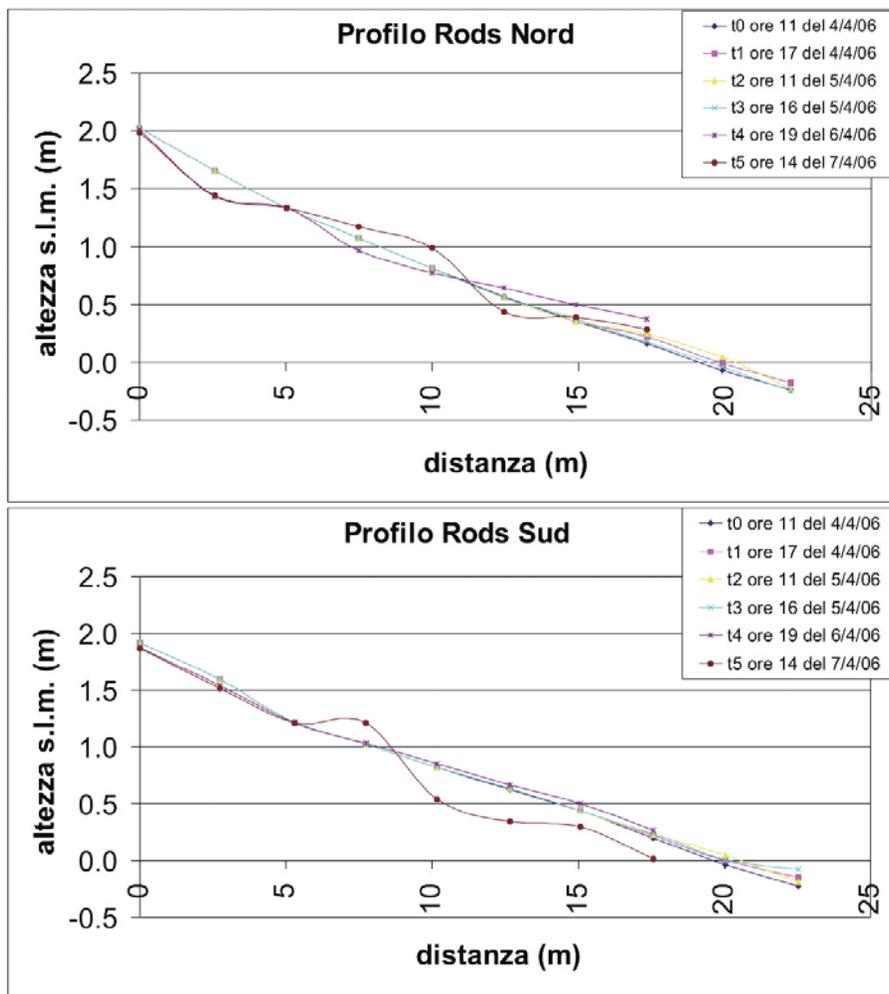


Figura 11 - Profili ottenuti dai rods situati a Nord ed a Sud del punto di iniezione.

L'ultimo rilievo (ore 14 del 7 aprile 2006) mette in evidenza come, in seguito all'arrivo di una mareggiata proveniente da N-NE, si cominci a riavere una sedimentazione nella parte medio-alta della spiaggia, con traslazione di sabbia proveniente dal piede della battigia.

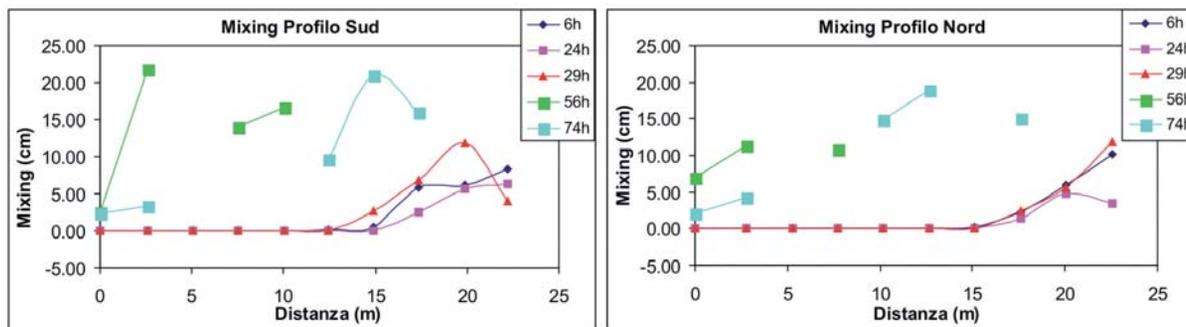


Figura 12 - Profondità di mixing lungo i due profili di rods (le sezioni mancanti sono dovute alla perdita di alcuni rods).

Tabella 1 - Parametri del mixing.

Tempo da t0	Mixing max	Mixing medio	Dist. Run-up max da Mixing max
6 h	10.2 cm	4.4 cm	10.5 m
24 h	6.3 cm	4 cm	4.9 m
29 h	11.9 cm	6.5 cm	7.3 m
56 h	21.9 cm	12 cm	n.d.
74 h	21 cm	10.75 cm	n.d.

**Dispersione dei traccianti**

I 200 Kg di sedimento colorato sono stati iniettati il 4 aprile 2006 dalle ore 15:00 alle 15:10 nella zona di swash, proprio a metà distanza tra i due profili di rods.

Al momento dell'iniezione il vento aveva direzione N-NE, con onde provenienti da N con un angolo di 30° rispetto alla linea di riva. Circa 3 ore dopo l'iniezione (quindi verso le ore 18:00) si sono iniziate le operazioni di monitoraggio dello spostamento del sedimento colorato.

La dominanza di venti provenienti da N-NE e onde provenienti da nord, ci ha portato a condurre le indagini principalmente verso sud, fino ad una distanza di circa 200 metri dal punto di iniezione.

Come spiegato in precedenza, l'analisi è stata effettuata direttamente sul posto attraverso la camera oscura ad UV (Fig. 2) ispezionando più intervalli sabbiosi per ogni punto di campionamento, tramite scavo di trincee.

Per quanto riguarda i punti nella zona di spiaggia sommersa, che quindi non potevano essere fotografati, si è effettuato il prelievo diretto di campioni fino alla -1 m che successivamente sono stati fotografati su fondo scuro.

Andando ad analizzare le nuvole di dispersione (Fig. 13) sia del tracciante grossolano (rosso) che del più fine (verde) si nota come in quattro ore il centro di massa si fosse spostato verso sud di circa 100 m e quindi con una velocità media pari a  $5 \cdot 10^{-3}$  m/sec (Tab. 2). Il tracciante sembra muoversi soprattutto ortogonalmente alla spiaggia verso il piede della battigia. Purtroppo non si è avuta la possibilità di campionare a profondità superiori alla -1 m a causa delle condizioni meteomarine poco favorevoli.

Il 5 aprile 2006 sono state effettuate due operazioni di monitoraggio del tracciante. La prima nella mattina tra le ore 10:00 e le 12:00 (Fig. 14), la seconda di sera tra le 18:00 e le 20:00. Esaminando le mappe di dispersione corrispondenti alle misure della mattina, si riscontra subito un cambiamento nella direzione di dispersione del tracciante, a causa del mutamento delle condizioni meteomarine, che nella nottata precedente avevano visto un ribaltamento della direzione di provenienza del vento (vento da S-SE, onde da S con un angolo di 30° rispetto alla linea di riva).

Sarebbe stato di grande utilità avere a disposizione i dati della boa ondometrica della RON situata davanti ad Ancona, ma purtroppo per il periodo in questione non ve ne sono disponibili, molto probabilmente per una avaria del sistema di acquisizione.

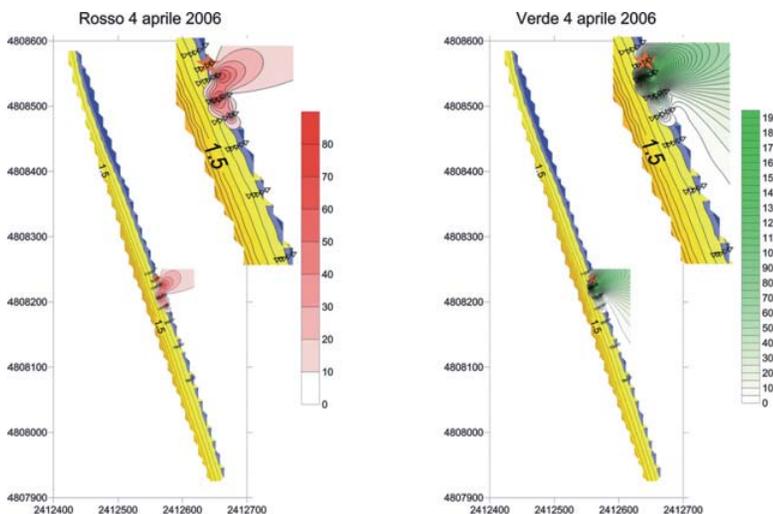


Figura 13 - Nuvole di dispersione dei traccianti rossi (a sinistra) e verdi (a destra) dopo 4 ore dall'iniezione (la scala indica il numero di grani colorati per m³). I triangolini neri rappresentano i punti di campionamento.

Si è deciso di omettere le mappe di dispersione relative ai giorni in cui la percentuale di recupero scendeva sotto il 60%, poiché risultavano poco interpretabili visivamente.

Andando comunque ad osservare i due traccianti in maniera separata, si vede come la granulometria più fine (verde) si sia spostata a velocità leggermente superiore rispetto al grossolano rosso. Difatti, nelle circa 16 ore trascorse dal rilievo precedente, il centro di massa del primo è stato traslato sino ad una distanza di 130 m a nord del punto di iniezione (velocità di circa  $2.3 \cdot 10^{-3}$  m/sec), mentre il secondo non supera i 70 metri e quindi la sua velocità può considerarsi pari a circa metà del precedente.

Cosa molto importante da notare è la concentrazione (di conseguenza anche la percentuale di recupero) di granelli colorati, che è diminuita rispetto al giorno precedente, sintomo di una possibile perdita verso mare ove si era nell'impossibilità di campionare. La perdita di concentrazione di tracciante si fa ancora più evidente nel rilievo della notte. Anche le diverse interpolazioni geostatistiche sembrano suggerire la dominanza di trasporto *cross-shore* a causa delle condizioni di moto ondoso, con mare molto mosso ed onde da S-SE di circa 1.5 m alla frangenza.

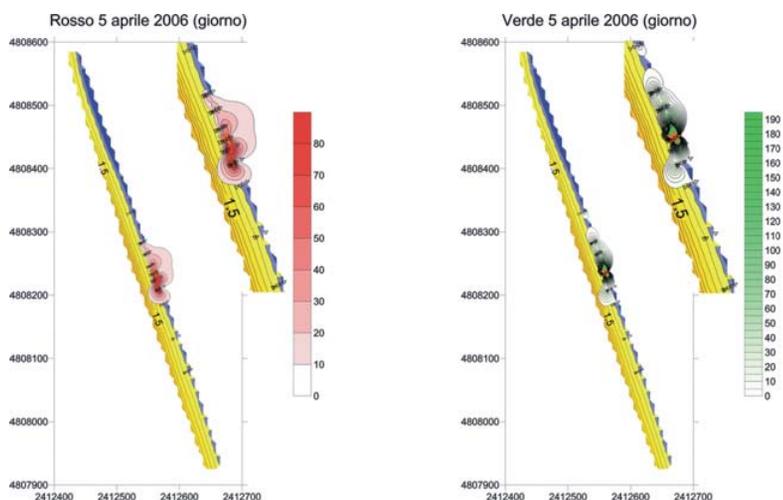
Infatti, il tracciante rosso (ghiaia) comincia ad essere ritrovato soprattutto al piede della battigia ed a distanze che non superano i 50 metri dal punto di iniezione. Anche per quanto riguarda il verde (sabbie), le concentrazioni diminuiscono drasticamente, ma si ritrova in parte anche sulla parte alta della spiaggia.

Tabella 2 - Velocità del centro di massa e percentuale di recupero per ogni colore.

Data rilievo	Velocità centro di massa rosso (ghiaie)	Percentuale di recupero (%RT) rosso	Velocità centro di massa verde (sabbie)	Percentuale di recupero (%RT) verde
4 aprile 06 ore 15	Iniezione	—	Iniezione	—
4 aprile 06 ore 20	$5 \cdot 10^{-3}$ m/sec	85%	$5 \cdot 10^{-3}$ m/sec	80%
5 aprile 06 ore 12	$1.2 \cdot 10^{-3}$ m/sec	60%	$2.3 \cdot 10^{-3}$ m/sec	55%
5 aprile 06 ore 20	$1.2 \cdot 10^{-3}$ m/sec	20%	$2.3 \cdot 10^{-3}$ m/sec	30%
6 aprile 06 ore 15	n.d.	Minore del 10%	n.d.	Minore del 10%
7 aprile 06 ore 12	n.d.	Minore del 10%	n.d.	Minore del 10%

Il 6 aprile 2006 il regime meteomarinario si presentava con vento da S-SE e onde provenienti da S con un angolo di  $30^\circ$  rispetto alla linea di riva (generando trasporto lungo costa verso nord). Si è osservata visivamente onda lunga da S-SE (altezza d'onda di circa 1.5 m) e mare molto mosso.

Il sedimento ghiaioso (rosso) si trovava ormai solo in tracce sulla spiaggia emersa a nord della zona di iniezione fino a circa 300 metri dal punto di iniezione. Data la bassa quantità di tracciante recuperato (inferiore al 10%) la velocità del centro di massa non veniva calcolata (Tab. 2).



Per quel che riguarda il verde (sabbie) si notano concentrazioni più elevate soprattutto in corrispondenza della foce del fiume Potenza.

Per quel che riguarda il verde (sabbie) si notano concentrazioni più elevate soprattutto in corrispondenza della foce del fiume Potenza.

Figura 14 - Nuvole di dispersione dei traccianti rossi (a sinistra) e verdi (a destra) alle ore 12 del 5 aprile 2006 (la scala indica il numero di grani colorati per m<sup>2</sup>). I triangolini neri rappresentano i punti di campionamento.

Il 7 aprile 2006, con condizioni di vento da N-NE e onde provenienti da N con un angolo di 20° rispetto alla linea di riva e trasporto verso sud, il mare risultava molto mosso, con onde che raggiungevano il limite superiore della spiaggia e rendevano difficili i rilievi. Si è riusciti comunque ad acquisire un numero tale di campioni sufficiente all'analisi della dispersione dei traccianti.

Dall'analisi statistica si riesce ancora una volta a dedurre come ormai gran parte del sedimento grossolano rosso sia andato a depositarsi al piede della battigia, mentre il verde riesce a depositarsi nella parte alta della spiaggia andando così a determinare una vera e propria classazione del sedimento.

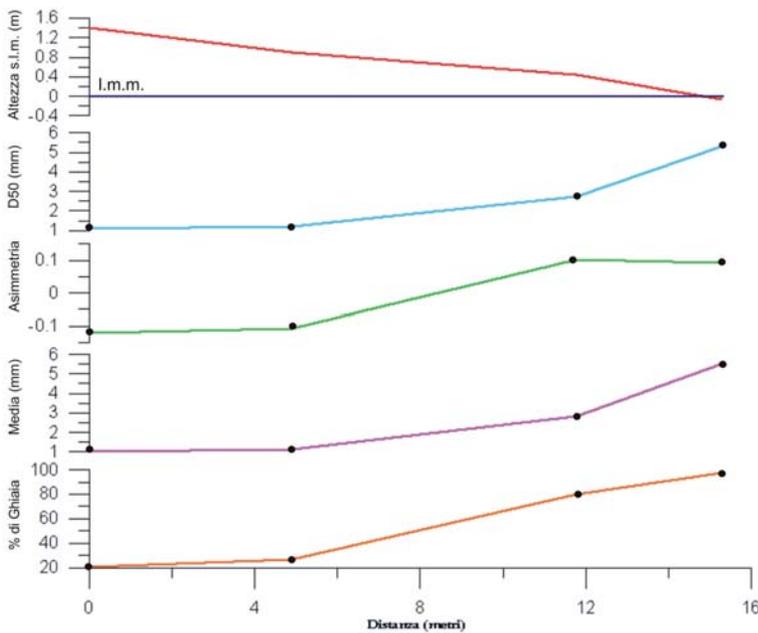


Figura 15 - Relazione tra la posizione dei campioni lungo il profilo (figura in alto) ed i parametri granulometrici lungo il profilo 6N. Le distanze orizzontali si riferiscono alla posizione del campione topograficamente più alto.

Dopo questi ultimi campionamenti, data la forte diluizione del sedimento colorato, si decideva di terminare il monitoraggio dei traccianti.

Tenendo conto che la profondità di mixing è risultata mediamente di 8 cm si sono potute calcolare le percentuali di recupero dei due traccianti (%RT):

$$\%RT = \frac{\sum (S \times N) \times (k \cdot h)}{N_{tot}} \times 100$$

Dove: S = superficie compresa tra due curve di isoconcentrazione del tracciante;

N = numero di traccianti per ogni superficie di isoconcentrazione;

k = variabile che tiene conto della diminuzione della concentrazione di tracciante con la profondità (nel nostro caso k = 0.3, assumendo una sezione triangolare del cuneo di sedimento rimobilizzato);

h = profondità di mixing;

N<sub>tot</sub> = numero iniziale di granelli colorati.

Per il 4 aprile 2006 abbiamo un 80% di recupero per la sabbia verde ed un 85% per la ghiaia rossa. La mattina del 5 aprile scendono rispettivamente a 55% e 60%. Già dal pomeriggio dello stesso giorno si assiste ad un notevole calo che porta la percentuale di recupero del rosso a 20% mentre per il verde è circa del 30% rendendo i dati già poco affidabili (White, 1998).

Per quanto riguarda i volumi di sedimento trasportati, calcolati moltiplicando la velocità del centro di massa per la sezione di mixing (Fig. 12 e Tab. 1), abbiamo che durante il primo giorno, con onde provenienti da nord, si ha un trasporto di  $1.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$ , mentre il giorno successivo, con onde da sud, scende a  $7.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ .

### *Analisi granulometriche e modello di McLaren*

Per un'analisi dei dati che permetta di descrivere in forma esaustiva le caratteristiche delle popolazioni granulometriche, si sono scelti come parametri la media, il  $D_{50}$ , la deviazione standard ed il coefficiente di Skewness.

I risultati delle analisi granulometriche indicano una mediana ( $D_{50}$ ) dominante corrispondente ad un materiale che va dalla sabbia grossolana alla ghiaia. Nella parte alta della spiaggia questa tende a diminuire il suo diametro se la si confronta con quella della battigia.

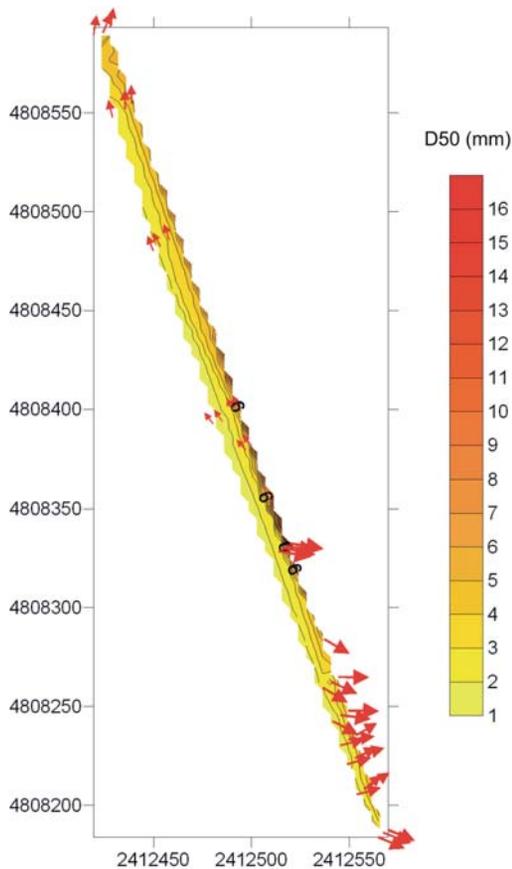
Per quanto riguarda la classazione si nota come spostandosi verso nord questa tenda a diminuire.

Dopo un'attenta analisi e numerose prove si è deciso che per spiaggia in questione può essere utilizzata la casistica numero 3 del modello di McLaren, ovvero quella in cui:

$$\text{CASO 3} \quad \sigma_2^2 > \sigma_1^2, \mu_2 < \mu_1, Sk_2 > Sk_1$$

Per quanto riguarda la maglia della griglia utilizzata per l'applicazione del metodo, si sono scelti 100 m, poiché, trovandoci su un tratto di costa lungo e stretto, è necessario che anche il valore dei punti situati su profili più lontani influisca su quello del punto preso in considerazione dal modello.

Analizzando la Figura 16, cioè quella relativa ai rilievi svolti il 6 aprile 2006, si nota una forte analogia con i dati ottenuti dai traccianti fluorescenti. Nel dettaglio si riescono a distinguere due direzioni principali di trasporto, una verso mare nella zona più a sud, e l'altra verso nord, con una zona di separazione del trasporto localizzata a 4808350 N.



**Figura 16 - Modello di McLaren basato sulle granulometrie del 6 aprile 2006.**

Confrontando questi risultati con quelli dello studio effettuato da Nordstrom e Jackson (1993) su un'altra spiaggia di tipo misto negli Stati Uniti, si nota come anche in quella situazione si sia riscontrato un trasporto differenziato in base alla granulometria, con selezione del sedimento ortogonamente al profilo di spiaggia.

Da notare però la differenza sostanziale tra i due esperimenti per quello che riguarda le condizioni meteorologiche, che nel caso presente sono state di alta energia, mentre in quello statunitense erano di bassa. Per quanto riguarda il nostro caso, abbiamo notato come le frazioni più grossolane si siano spostate verso profondità maggiori, mentre sulla spiaggia si depositavano le più fini. Al contrario di quello notato durante l'esperimento oggetto del presente studio, gli autori precedenti identificavano accumulo di materiale ghiaioso/ciottoloso sulla spiaggia emersa.

### Conclusioni

Lo studio presentato in questo lavoro si è concentrato sulle dinamiche di trasporto sedimentario su una spiaggia di tipo riflettente, costituita da sabbie grossolane e ghiaie fini di composizione carbonatica. Si sono utilizzati traccianti fluorescenti tramite analisi della dispersione *in-situ*, utilizzando un sistema di analisi delle immagini appositamente progettato.

Attraverso gli studi realizzati tramite traccianti fluorescenti si è potuto dimostrare come in condizioni di alta energia del moto ondoso la frazione ghiaiosa si deposita alla base della battigia, mentre la sabbia viene spostata verso la parte più alta della spiaggia.

Lo studio quantitativo attraverso traccianti è stato confrontato con un'analisi degli assi di transito sedimentario tramite metodi di dispersione statistica basati sul calcolo dei vettori residuali di trasporto. Si rammenta che di per sé quest'ultima metodologia può produrre risultati difficilmente interpretabili e non è esente da critiche nell'ambito della letteratura internazionale (Masselink, 1992; Roux, 1994). In occasione dello studio sperimentale oggetto del presente lavoro si è provato a confrontare le osservazioni dirette di trasporto con i vettori di dispersione e si può concludere che il metodo può fornire informazioni accettabili da un punto di vista qualitativo.

La parte finale dell'esperimento è stata caratterizzata da un livello decrescente di energia del moto ondoso ma purtroppo la diluizione del tracciante non ha permesso di ottenere informazioni di tipo quantitativo. Si è però osservato che al decrescere dell'energia dei frangenti la frazione ciottolosa, non studiata in questa occasione, tende a riapparire sulla spiaggia. La futura sperimentazione si concentrerà nell'inclusione di tale frazione grossolana nello studio del trasporto sedimentario.

### Ringraziamenti

Il lavoro descritto in questa memoria è stato finanziato attraverso i fondi CADSEALAND della Regione Marche.

Si ringraziano la dott.ssa Clara Armaroli, la dott.ssa Manuela Gardelli, gli studenti Andrea Alessandrini e Francesco Bassano dell'Università di Camerino per la preziosa collaborazione durante le fasi di monitoraggio in loco.

Si esprime un caloroso ringraziamento agli ingegneri Cinzia Montironi, Giorgio Filomena e Vincenzo Marzialetti della Regione Marche per il fondamentale appoggio durante tutte le fasi dell'esperimento.

### Bibliografia

- Anfuso G. (2005) - *Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches*. Marine Geology, 220: 101-112.
- Chapman D.M. e Smith A.W. (1977) - *Methodology of a large scale sand tracer experiment*. Proceedings of 3rd Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, Melbourne, Australia, pp. 185-189.
- Ciavola P., Taborda R., Ferreira Ó. e Dias J.M.A. (1997a) - *Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal*. Journal of Coastal Research, 13: 1119-1129.
- Ciavola P., Taborda R., Ferreira Ó. e Alveirinho Dias, J. (1997b) - *Field observations of sand-mixing depths on steep beaches*. Marine Geology, 141: 147-156.
- Ciavola P., Dias N., Ferreira Ó., Taborda R. e Dias J.M.A. (1998) - *Fluorescent sands for measurements of longshore transport rates: a case study from Praia de Faro in southern Portugal*. Geo-Marine Letters, 18: 49-57.
- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E. e Balouin, Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 2005 (1): 41-57.
- Ciavola P., Nadalini F., Ardone V. (2006) - *Depth of sand activation on protected and non-protected nourished beaches: a laboratory study in a large-scale wave flume*. Proceedings of Coastal Dynamics 2005, ASCE, New York, USA.

- Ekwurzel B. (1988) - *The sediment dynamics of a meso-tidal, mixed sand and gravel, bayside beach: Herring Cove, Cape Cod, MA*. Tesi non pubblicata. Dipartimento di Geologia, Rutgers University, New Brunswick, NJ. 193 pp.
- Eliot I.G. e Clarke D.J. (1988) - *Semi-diurnal variation in beachface aggradation and degradation*. Marine Geology, 79: 1-22.
- Ferreira O., Ciavola P., Taborda R., Bairros M. e Dias J.M.A. (2000) - *Sediment mixing depth determination for steep and gentle foreshores*. Journal of Coastal Research, 16: 830-839.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Gao S. e Collins M. (1991) - *A critique of the "McLaren method for defining sediment transport paths - Discussion*. Journal of Sedimentary Petrology, 61 (1): 143-146.
- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedimentary Geology, 80: 47-60.
- Greenwood B. e Hale P.B. (1980) - *Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred beach environment*. The Coastline of Canada., S.B. McCann (ed.). Geological Survey of Canada, pp. 89-109.
- Gonzales R., Ciavola P., Corbau C., Falati S. e Ferreira Ó. (2004) - *Mixing depth experiments on an estuarine beach; St. Georges Beach, Gironde (France)*. Special Issue of Journal of Coastal Research, SI41: 43-52.
- Ingle J.C. (1966) - *The Movement of Beach Sand*. Elsevier Publishing, Amsterdam. pp. 221.
- Komar P. e Inman D. (1970) - *Longshore sand transport on beaches*. Journal of Geophysical Research, 75: 5514-5527.
- Kraus N.C., Isobe I., Igarashi H., Sasaki T.O. e Horikawa K. (1982) - *Field experiments on longshore sand transport in the surf zone*. Proceedings of the 18th International Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 969-988.
- Kraus N.C. (1985) - *Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone*. Journal of Sedimentary Petrology, 55: 3-14.
- Lanckneus J., De Moor G., De Schaepmeester G., Meyus I. e Spiers V. (1992) - *Residual sediment transport directions on a tidal sand bank*. In: Bulletin de la Soc. Belge d'Etudes Géog., SOBEG, pp. 425-445.
- Masselink G. (1992) - *Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone delta, Southern France: a test of the "McLaren Model"*. Journal of Coastal Research, 8 (2): 286-291.
- McLaren P. (1981) - *An interpretation of trends in grain size measurements*. Journal of Sedimentary Petrology, 51 (2): 611-624.
- McLaren P. e Bowles D. (1985) - *The effects of sediment transport on grain-size distributions*. Journal of Sedimentary Petrology, 55 (4): 457-470.
- Nordstrom K.F. e Jackson N.L. (1993) - *Distribution of surface pebbles with changes in wave energy on a sandy estuarine beach*. Journal of Sedimentary Petrology, 63 (6): 1152-1159.
- Pedrerros R., Howa H.L. e Michel D. (1996) - *Applications of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas*. Marine Geology, 135: 35-49.
- Roux J.P. (1994) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" - comment*. Sedimentary Geology, 90: 153-156.
- Russell R.C.H. (1960) - *Use of fluorescent tracers for the measurement of littoral drift*. Proceedings of the 7th International Coastal Engineering Conference ASCE, pp. 419-444.
- Taborda R., Ferreira Ó., Dias J.M.A. e Moita P. (1994) - *Field observations of longshore sand transport in a high energy environment*. In: de Carvalho S. and Gomes V., (eds), Proceedings of Littoral 94. Lisbon, Portugal: EUROCOAST Portugal, pp. 479-487.
- Tonk A. e Masselink. G. (2005) - *Evaluation of longshore transport equation with OBS sensor, streamer traps and fluorescent tracers*. Journal of Coastal Research, 21: 915-931.
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). Coastal Engineering Manual, Parte II, Capitolo 4. Surf Zone Hydrodynamics. EM 1110-2-1100.
- Vila-Concejo A., Ferreira O., Ciavola P., Taborda R. e Dias J.M.A. (2003) - *Qualitative and quantitative analyses of tracer data: straight beaches, inlets and harbours*. Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments 2003. CD-ROM Published by World Scientific Publishing Corp. and East Meets West Productions, Corpus Christi, Texas, USA. ISBN 981-238-422-7.

- Vila-Concejo A., Ferreira O., Ciavola P., Taborda R. e Dias J.M.A. (2004) - *Tracer studies on the updrift margin of a complex inlet system*. Marine Geology, 208: 43-72.
- White T.E. (1998) - *Status of measurement techniques for coastal sediment transport*. Coastal Engineering 35: 17-45.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, 56: 93-118.
- [www.autoritabacino.marche.it](http://www.autoritabacino.marche.it)
- Yasso W.E. (1966) - *Formulation and use of fluorescent tracers coatings in sediment transport studies*. Sedimentology, 6: 287-301.
- Zenkovitch V.P. (1960) - *Fluorescent substances as tracers for studying the movements of sand on the sea bed*. The Dock and Harbour Authority XL: 280-283.

**Ricevuto il 22/02/2007, accettato il 29/05/2007.**