



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**SEZIONE DI GEOLOGIA APPLICATA E GEOFISICA APPLICATA**

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria del Territorio*

*XIX Ciclo*

**STUDIO GEOMORFOLOGICO E TENDENZE EVOLUTIVE  
DEL LITORALE DI CAGLIARI - QUARTU SANT'ELENA**

Tesi di Dottorato di: ALESSANDRO LAI

Tutor: Prof. GIOVANNI BARROCU

## **PREFAZIONE E RINGRAZIAMENTI**

Le pagine che seguono racchiudono il lavoro svolto in questi ultimi anni e rappresentano, oltre che il prodotto di un impegno intellettuale e fisico, il risultato di un percorso di vita fatto d'esperienze stimolanti, utili e appaganti.

Le tematiche affrontate nel corso della tesi, i luoghi oggetto dello studio, le ricerche, le letture, i convegni, gli aggiornamenti, i corsi di perfezionamento e le strumentazioni hardware e software che ho potuto frequentare e apprendere, hanno notevolmente contribuito a soddisfare la mia costante curiosità e voglia di crescita. Questo cammino, tuttavia, sarebbe stato assai meno piacevole e fruttuoso, per non dire impossibile, senza l'aiuto ed il sostegno di alcune persone alle quali desidero esprimere la mia gratitudine.

Desidero, innanzitutto, ringraziare il mio tutor, il prof. Barrocu, per la pazienza, l'appoggio ed i consigli con i quali mi ha incoraggiato per tutto il mio periodo di dottorato; Claudio D'Isanto, dottore di ricerca, esperto di tecniche di rilievo marino presso lo I.A.M.C. di Napoli, col quale ho avuto frequenti scambi di opinioni e pareri tecnico-scientifici; Giuseppe Puliga, geologo marino, con il quale ci siamo suddiviso il lavoro per lunghi tratti di battigia durante i rilievi in GPS-RTK; Lamber Hulsen, Arjen Luijendijk ed Hans de Vroeg della W | L Delft Hydraulics, ai quali devo l'apprendimento di molti dei software di modellazione numerica e ai quali sono grato per i loro consigli e la cordiale disponibilità; Gianni e Carlo Vadilonga, per il loro supporto nelle operazioni di rilievo topografico; Angelo Figus, collega nell'attività professionale, per il suo aiuto e sostegno morale. Per il suo prezioso aiuto "sedimentologico", pazienza e disponibilità desidero ringraziare particolarmente Claudio Kalb, dottorando in Scienze della Terra.

Desidero ringraziare anche i miei amici e colleghi del dipartimento che, fin dai tempi "pre-laurea", mi sono stati sempre vicini: Valeria, Alessandro, Maria Grazia, Paolo e tutti i colleghi e tecnici della Sezione di Geologia Applicata e Geofisica Applicata.

Un particolare ringraziamento lo rivolgo ad Andrea, Francesco e al prof. Gian Paolo Ritossa per il ruolo insostituibile che hanno avuto in questi anni, essi mi hanno sempre assistito moralmente e materialmente, mettendomi a disposizione i mezzi e attrezzature della società in cui svolgo l'attività professionale.

Tutti quanti sono stati determinanti sotto diversi aspetti ma, cosa che più mi preme sottolineare, hanno condiviso il mio percorso di uomo.

Dedico infine l'ultimo ringraziamento e la tesi stessa alla mia famiglia: i miei genitori, mio fratello Luigi e Valentina. L'inizio e la fine di ogni mio pensiero.

## **INDICE**

PREMESSA .....	1
1 IL LITORALE DEL POETTO.....	3
1.1 COLLOCAZIONE GEOGRAFICA.....	3
1.2 STUDI PRECEDENTI SULLE TENDENZE EVOLUTIVE DEL LITORALE CAGLIARITANO E QUARTESE DEL POETTO .....	5
1.3 REGIME METEO-MARINO .....	8
1.3.1 REGIME ONDOSO .....	9
1.4 REGIME ANEMOMETRICO .....	15
2 CAMPAGNE DI RILEVAMENTO E RICERCA BIBLIOGRAFICA DEI DATI DISPONIBILI.....	18
2.1 RILIEVO TOPOGRAFICO DELLA LINEA DI RIVA.....	19
2.1.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DGPS.....	20
2.1.2 METOLOGIA DEL RILIEVO E RESTITUZIONE CARTOGRAFICA 23	
2.1.3 RISULTATI ED ANALISI COMPARATA TRA I RILIEVI .....	26
2.2 RILIEVO BATIMETRICO.....	34
2.3 ANALISI GRANULOMETRICHE E COMPOSIZIONALE.....	36
2.3.1 GRANULOMETRIE.....	38
2.3.2 ANALISI COMPOSIZIONALE .....	39
2.3.3 RISULTATI RILIEVO 2007 .....	41
2.3.4 RISULTATI RILIEVO 2003 .....	44
2.3.5 ANALISI COMPARATA RILIEVO 2003 – RILIEVO 2007 .....	46
2.4 MAPPATURA DEI SEDIMENTI E CALCOLI VOLUMETRICI DISPONIBILI.....	51
2.5 ANALISI DEI RISULTATI DEI DATI RILEVATI E DETERMINAZIONE DELLE LINEE EVOLUTIVE IN ATTO .....	54
3 MODELLAZIONE NUMERICA .....	57
3.1 STUDIO DELL'AREA D'INTERVENTO .....	58
3.1.1 VENTO.....	59
3.1.2 FORZANTI DI MOTO ONDOSO .....	60
3.2 SWAN .....	61



3.3	UNIBEST .....	63
3.3.1	FORMULA DI TRASPORTO .....	67
3.3.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO .....	69
3.3.3	RISULTATI .....	71
3.4	DELFT3D.....	75
3.4.1	DELFT3D MODELLING SYSTEM .....	75
3.4.2	IMPOSTAZIONI DEL MODELLO .....	88
3.4.3	RISULTATI MODELLO DELFT3D.....	90
4	CONCLUSIONI.....	94
5	SVILUPPI FUTURI .....	96
	BIBLIOGRAFIA.....	97
	ALLEGATI .....	104

## **PREMESSA**

L'interesse per lo studio geomorfologico della spiaggia del Poetto è sorto per la mia passione per il mare, che dopo la laurea mi ha portato a partecipare a numerose campagne idrografiche e a rilievi costieri ed a frequentare un periodo di specializzazione presso la W | L Delft Hydraulics di Delft (Olanda) dove ho iniziato a lavorare nel campo della modellazione numerica applicata all'ingegneria costiera.

L'idea della ricerca è nata quando ho avuto l'occasione di partecipare ad una campagna di rilevamento idrografico svolta nell'ambito del piano di monitoraggio dell'intervento di ripascimento della spiaggia del Poetto.

Sentii allora il desiderio di capire quali fossero i processi che determinavano l'evoluzione del litorale, perché l'erosione fosse più marcata da una parte piuttosto che dall'altra, quale sarebbe stata l'erosione se per il ripascimento si fosse utilizzata sabbia di diversa granulometria.

E mi chiedevo se, sulla base dei risultati dei rilievi cui stavo partecipando, sarebbe stato possibile prevedere come si sarebbe evoluta la linea di riva per l'effetto delle correnti sulla costa sommersa modificata dal ripascimento.

Fu per trovare spiegazione a tali quesiti che partecipai al concorso per l'ammissione per il XIX ciclo del corso di Dottorato di Ingegneria del Territorio, che ho potuto frequentare senza borsa. Lo studio ha riguardato la ricerca bibliografica, le campagne di rilievi sulla spiaggia emersa e sommersa, le analisi di laboratorio e la modellazione numerica. Seguendo tale procedimento logico, l'esposizione della tesi è articolata in due parti principali.

Nella prima parte, costituita dai capitoli 1, 2 e 3, espongo i dati disponibili derivati da studi e campagne di monitoraggio precedentemente effettuate ed i risultati delle 4 campagne da me appositamente svolte con mezzi propri per questa ricerca, nonché la determinazione delle dinamiche in atto nel litorale attraverso un'analisi oggettivata dalle risultanze rilevate.

Nella seconda parte, costituita dal capitolo 5, espongo l'impostazione, la descrizione ed i risultati dei modelli numerici utilizzati al fine della determinazione delle linee evolutive in atto e future del litorale.

La simulazione numerica è avvenuta grazie all'applicazione dei modelli SWAN<sup>1</sup>, UNIBEST e DELFT3D<sup>2</sup>, rispettivamente dedicati al calcolo di trasformazione del moto ondoso, all'analisi evolutiva della linea di riva ed al calcolo dei campi idrodinamici e di trasporto solido costiero.

La tesi si conclude con l'esposizione dei risultati raggiunti e l'indicazione dei possibili nuovi scenari di ricerca.

---

<sup>1</sup> SWAN sviluppato dalla Delft University of Technology (Olanda)

<sup>2</sup> UNIBEST e DEFT3D, sviluppati dalla W | L Delft Hrydraulics (Olanda)

# 1 IL LITORALE DEL POETTO

## 1.1 COLLOCAZIONE GEOGRAFICA

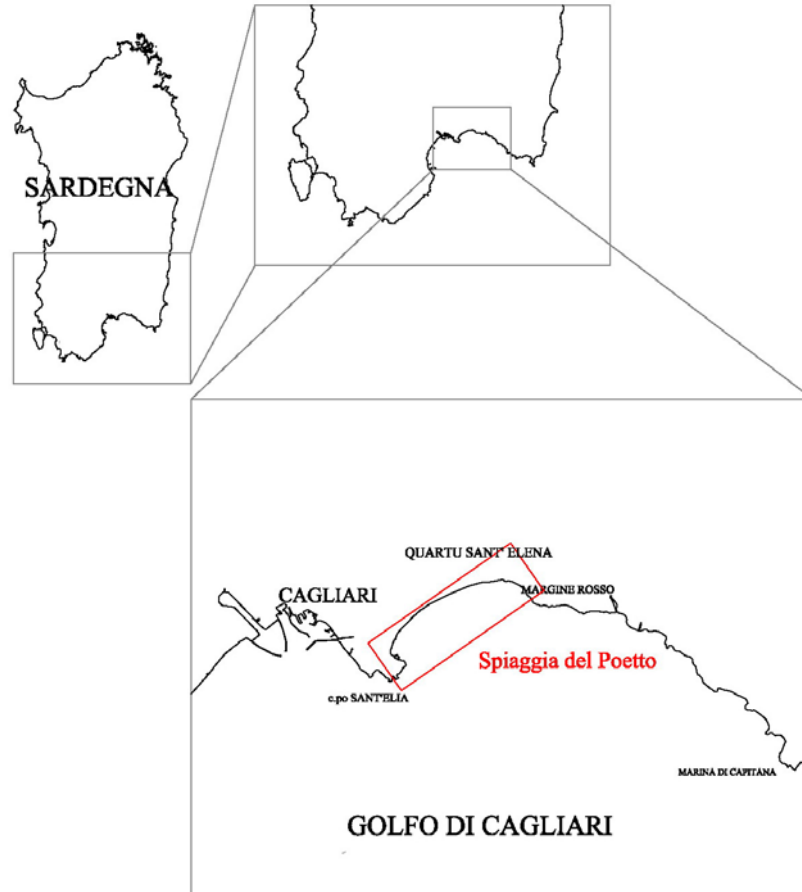


Figura 1: Inquadramento della zona oggetto dell'area di ricerca.

La spiaggia del Poetto si estende sul settore orientale del Golfo di Cagliari, dal promontorio della Sella del Diavolo all'Ospedale Marino in territorio di Cagliari e da questo punto al Margine Rosso in territorio di Quartu Sant'Elena per una lunghezza complessiva di 7.700 m (Figura 1).

Esso è rappresentato all' 1: 25.000 IGMI nel F. 557, sezione II Cagliari e sezione III Quartu S.Elena <sup>3</sup>; nel F. 566 sezione IV La Maddalena <sup>4</sup> all' 1:10.000 della Carta Tecnica Regionale nella sezione 566020 Sant'Elia, nella sezione 566030 Torre del Poetto, nella sezione 577140 Cagliari e nella sezione 557150 Quartu S.Elena<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Levata 1989

<sup>4</sup> Levata 1989

<sup>5</sup> Levata 1998

La prima levata topografica all'1:50.000 risale al 1898 (Figura 2), e ad essa si è fatto riferimento per mettere in evidenza le modifiche del litorale fatte dall'uomo.

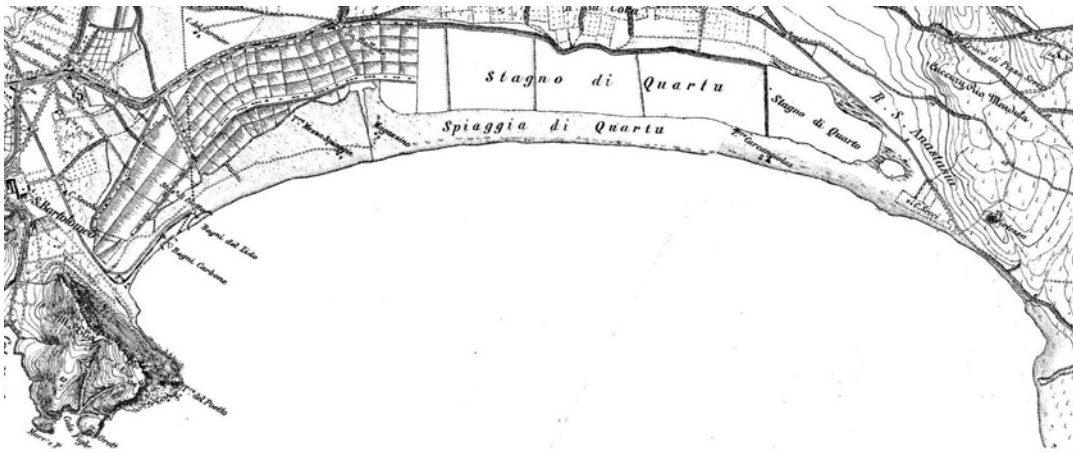


Figura 2: Rappresentazione all'1:50.000 della tavola topografica dell'Istituto Geografico Militare Italiano della spiaggia del Poetto così come rilevato nel 1899.



Figura 3: Fotografia aerea del Litorale del Poetto nel 1943. (Fonte: Dipartimento di Geografia dell'Università di Kiel in Germania).

Del litorale esistono varie riprese fotogrammetriche, fra le quali si è presa in particolare considerazione la levata della Luftwaffe del 1943 (Figura 3).

## **1.2 STUDI PRECEDENTI SULLE TENDENZE EVOLUTIVE DEL LITORALE CAGLIARITANO E QUARTESE DEL POETTO**

Il litorale del Poetto è costituito essenzialmente da sabbie sciolte di composizione quarzoso-feldspatica e, in minor misura carbonatica, depositate dai corsi d'acqua che nel Pleistocene-Olocene completarono l'intensa erosione che portò alla morfologia attuale dei rilievi granitici e scistosi del Sarrabus, il blocco tettonico che delimita ad est la fossa tettonica del Campidano (Barrocu ed al., 1979). Secondo Segre (1968) l'attuale morfologia degli stagni e delle dune si sarebbe delineata a seguito di una regressione in epoca romana. In realtà il litorale del Poetto, come tutti i cordoni litorali che racchiudono gli stagni costieri della Sardegna e del Mediterraneo, si depositarono a seguito dell'innalzamento del livello del mare avvenuto nell'ultimo post-Glaciale del Würmiano. Il cordone litorale, come tutte le coste del Mediterraneo, è in fase di lenta sommersione per l'aumento del livello marino di circa 2 m dall'inizio dell'età cristiana.

L'evoluzione costiera del litorale cagliaritano e quartese ha subito, soprattutto negli ultimi due secoli, pesanti modificazioni in larga parte dovute all'azione dell'uomo.

Il riassetto delle saline, le costruzioni delle strade lungo il litorale, l'intercettazione dei corsi d'acqua dei bacini idrografici retrostanti il Poetto, l'antropizzazione del retrospiaggia, la sottrazione di quantità ingenti di materiali sabbiosi per le attività costruttive che hanno portato alla completa distruzione delle dune a causa dei forti prelievi per la ricostruzione della città distrutta dai bombardamenti, sono solo alcuni esempi significativi di quanto siano stati influenti i fattori "esterni" alle normali dinamiche *naturali* morfologiche della costa.

Gli studi precedentemente svolti sull'individuazione delle dinamiche litorali in atto nel Poetto, mostrano infatti una sostanziale discontinuità tra quelle che erano le evidenze evolutive di 50 anni fa' (Pinna, 1956)<sup>6</sup> con quelle registrate nella seconda parte del XX secolo (Di Gregorio ed al., 1998<sup>7</sup>; Franco ed al., 1999<sup>8</sup>; Briganti ed al., 2004<sup>9</sup>).

---

<sup>6</sup> Pinna M, Spano B., Le spiagge della Sardegna – CNR – Centro di studi per la geografia fisica presso l'istituto di geografia dell'università di Bologna- 1956

<sup>7</sup> Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G., Ginesu S., - Atlante delle spiagge della Sardegna, 1998

<sup>8</sup> Franco L.Contini P., Milana G., Saltari D. Studio della evoluzione della spiaggia con modello ad una linea – Progetto di Salvaguardia del Litorale del Poetto - 1999

Nel 1956 Mario Pinna nelle “Spiagge della Sardegna” (C.N.R.) scriveva: “Appare evidente...che l’arretramento della battigia si è compiuto con ritmo più intenso nella parte orientale che in quella occidentale e che[...] nella parte occidentale (del Poetto n.d.r.) non si siano avute modificazioni di rilievo negli ultimi 100 anni.”

Nella parte orientale egli registrava un arretramento medio tra i 15 ed 40 m con punte di 60 m (e conseguente totale distruzione) nella spiaggia antistante la spiaggia litoranea per Villasimius presso il Margine Rosso (vedi Figura 1).

In sostanza, le evidenze facevano supporre che nei due tratti di spiaggia i processi erosivi si evolvessero in modo piuttosto costante.

Nel 1998, a oltre 40 anni di distanza, “la tendenza evolutiva delle linee di riva è verso l’arretramento, talora anche accentuato (Poetto nel tratto tra Marina Piccola e gli stabilimenti balneari<sup>10</sup> [...] tranne che nell’estremità del Golfo di Quartu S.E. (zona tra Torre Carcangiolas e Margine Rosso)” (Di Gregorio ed al 1998) tanto che nella Carta del rischio geoambientale nelle coste della Sardegna (Atzeni ed al, 1998)<sup>11</sup> si classificava il Poetto come una spiaggia a rischio di classe A, fra i “tratti di litorale a rischio molto elevato ove l’erosione è tale per cui a breve termine (0/10 anni) è ipotizzabile un’alta probabilità di danni a beni di notevole entità”.

Nei già citati studi Franco (1999) e Briganti (2004) danno una sostanziale conferma di questa nuova linea evolutiva in antitesi con quella riportata dal Pinna.

Una così sostanziale discrepanza non può ragionevolmente essere totalmente imputabile alle mutate condizioni meteo-marine che pure ci deve essere stata, ma piuttosto a quei fattori di trasformazione introdotte dall’uomo cui si accennava in precedenza.

Il recente intervento di ripascimento ha introdotto un nuovo fattore di modificazione della costa che dal 2002, anno dell’esecuzione del progetto, si è evoluto secondo uno schema che in questo studio sono analizzati alla luce dei rilievi da me appositamente condotti per lo sviluppo della presente.

---

<sup>9</sup> Briganti R., Contini P., Franco L., Nunziati A., Milana G., -MODIMAR - Rapporto n.3. Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondametrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica. (2004)

<sup>10</sup> Ovvero nel tratto occidentale

<sup>11</sup> ATZENI A., S. DEMURO, F. DI GREGORIO, G. PIRAS -Carta del Rischio Geo-Ambientale nelle Coste della Sardegna – 2004 pubblicato unitamente a: Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G., Ginesu S., - Atlante delle spiagge della Sardegna, 1998

La mancanza di significativi apporti e prelievi negli ultimi 5 anni consente oggi una nuova interpretazione delle dinamiche costiere depurata da quei fattori che rendevano assai difficoltosa questa analisi, e di prevedere, per quanto possibile, come in futuro potrebbe evolversi la linea di riva, qualora non si verificassero eventi turbativi.



### 1.3 REGIME METEO-MARINO

Il piano di monitoraggio varato dalla Provincia di Cagliari nell'ambito dell'intervento di salvaguardia del litorale di Cagliari – Quartu S.E. avvenuto nel marzo 2002, è stato preceduto e seguito da diverse campagne di misura finalizzate al controllo evolutivo della spiaggia. Ciò ha reso disponibili, per il periodo in cui tale monitoraggio è stato attivo, numerosi dati sul clima ondoso ed anemologico.

In particolare, ho potuto disporre dei dati della boa ondometrica in funzione dal luglio 2001 fino al gennaio del 2004 e dei dati anemometrici della stazione posta in corrispondenza del “Lido”<sup>12</sup>, in funzione dall'ottobre del 2002 al luglio del 2004.

Ho poi reperito altri dati in bibliografia, con i quali ho potuto integrare quelli già a disposizione e stabilire se, ed in che misura, i dati del monitoraggio conclusosi nel 2004 fossero rappresentativi del clima medio del Golfo.

Le ricerche hanno posto in evidenza una sostanziale mancanza di dati ondometrici registrati per il Golfo di Cagliari. Pertanto per ottenere indicazioni utili allo scopo, ho riportato i dati *osservati* dalla stazione semaforica (ormai chiusa) di Capo S. Elia<sup>13</sup> della Marina Militare e quelli *osservati* e riportati nella tavole UKMO – Bracknell per il canale di Sardegna. Tali dati, pur non essendo frutto di misurazioni rigorose, offrono la garanzia di una buona rappresentatività in termini di estensione storica, di direzione di provenienza degli stati del mare e di intensità.

L'esito positivo di questa comparazione mi ha permesso di assumere come verosimile l'ipotesi che le forzanti ondose poste alla base del modello di evoluzione del litorale siano costanti, così come ho esposto nei seguenti capitoli.

---

<sup>12</sup> Lo stabilimento balneare il Lido è ubicato nella parte occidentale del Poetto, nel territorio comunale di Cagliari a circa 900 m dalla estremità sud-occidentale della spiaggia..

<sup>13</sup> I.I.M. Istituto Idrografico della Marina, Il vento e lo stato del mare lungo le coste italiane e dell'adriatico, 1980.

### 1.3.1 REGIME ONDOSO

#### 1.3.1.1 DATI BOA ONDAMETRICA

I dati ondametrici che ho utilizzato sono stati registrati dalla boa ondamentrica installata dal Provincia di Cagliari nell'ambito del progetto di monitoraggio dell'intervento di salvaguardia del litorale del Poetto.

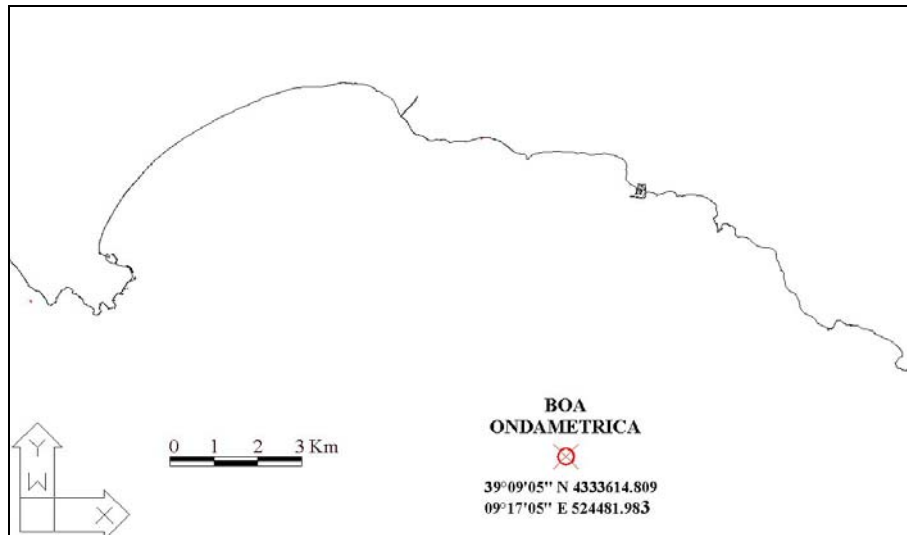


Figura 4: Localizzazione della boa ondamentrica posta a largo del litorale cagliaritano. La boa è stata in funzione dal 01/07/2001 al 31/01/2004

La boa, installata a 7 miglia a largo dalla spiaggia su una profondità approssimativa di 50 m (vedi Figura 4), è entrata in funzione il 01/07/2001 ed ha registrato i dati ondamentrici fino al 31/01/2004. Le registrazioni effettuate hanno scansioni trioraria ma esse sono state anche più frequenti per gli eventi intensi. I parametri estratti utilizzati nell'analisi di seguito riportata sono: l'altezza significativa spettrale  $H_s$  [m], il periodo di picco  $T_p$  [s] e la direzione media di provenienza del moto ondoso [ $^{\circ}$ N].

La percentuale dei dati effettivamente registrati rispetto a quelli registrabili è stata particolarmente elevata: a fronte di una capacità teorica di 7560 dati misurabili, infatti, oltre l'84 % è stato effettivamente registrato con successo. La Figura 5 mostra il grafico delle altezze d'onda significativa [m] registrate dalla boa ondamentrica di Cagliari nel periodo 01/07/2001÷31/01/2004. Si nota che le registrazioni sono in alcuni punti, lacunose ma ciò non ha inficiato la rappresentatività dei dati, disponibili in gran numero. L'analisi dei dati pone in evidenza un regime fortemente caratterizzato dagli

eventi provenienti dal 2 quadrante con particolare riferimento alle onde di scirocco (vedi Figura 7).

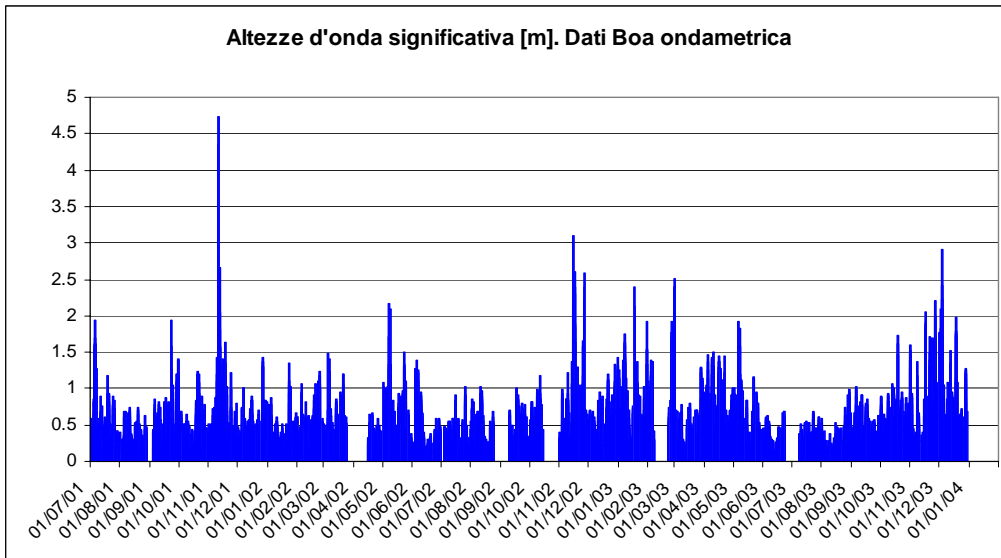


Figura 5: Grafico delle altezze d'onda significativa [m] registrate dalla boa ondametrica di Cagliari nel periodo 01/07/2001÷31/01/2004. Si notano delle lacune di registrazione che, comunque, non hanno inficiato la rappresentatività del dato: la resa di restituzione stata superiore all'83% del dato teoricamente registrabile.

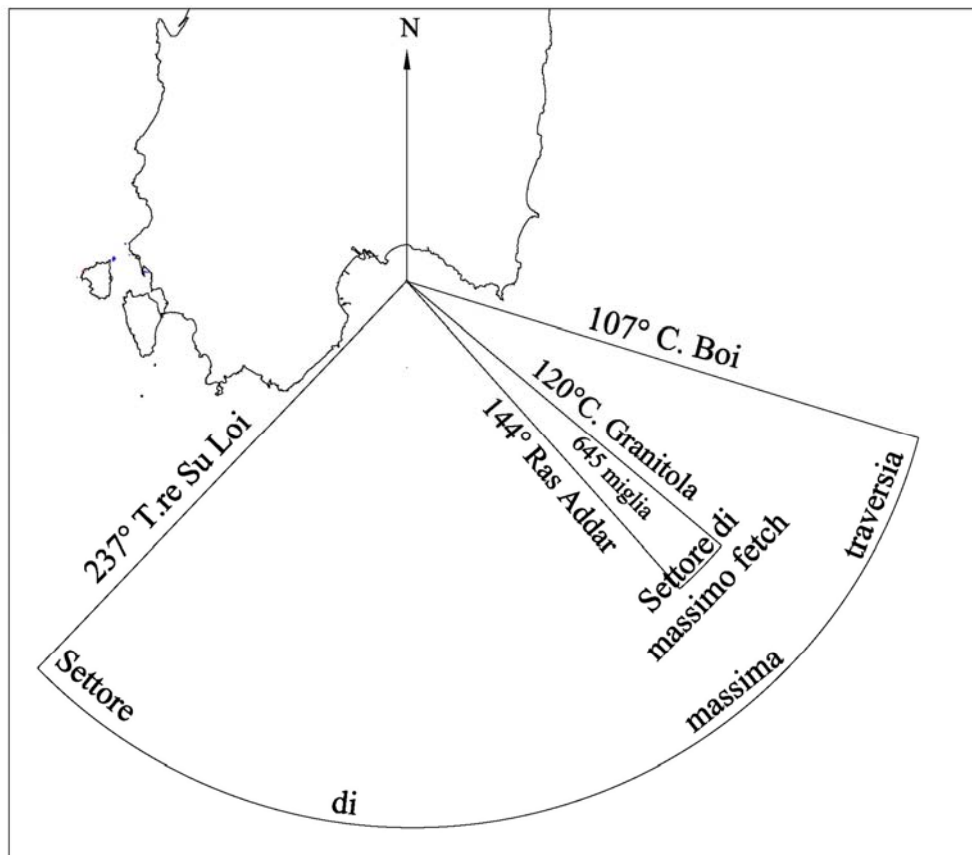


Figura 6: Settori di massima traversia del Golfo di Cagliari.

Quest' ultimo rappresenta il settore di traversia prevalente per frequenza e intensità.. Gli eventi superiori ai 2 m di Hs sono in larghissima parte provenienti da SE (vedi Tabella 1). Il terzo quadrante contribuisce limitatamente alla determinazione delle dinamiche litorali, con appena il 6% delle osservazioni totali registrate. Gli eventi del terzo quadrante, di altezze significative mai elevate, si concentrano maggiormente nel settore compreso tra i 190 ed i 210°N. Gli eventi del primo e quarto quadrante hanno frequenze di occorrenza minime poiché provenienti da terra (Figura 6). La Figura 7 mostra la distribuzione direzionale degli eventi registrati in termini di occorrenza percentuale. Nella Tabella 2 sono riportati in maniera sintetica tutti i dati registrati, raccolti per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza.

DATA	H <sub>s</sub> [m]	DIREZIONE [°N]
<b>11/11/01</b>	<b>4.74</b>	<b>137</b>
<b>15/11/02</b>	<b>3.10</b>	<b>139</b>
<b>04/12/03</b>	<b>2.90</b>	<b>143</b>
<b>11/11/01</b>	<b>2.88</b>	<b>149</b>
<b>16/11/02</b>	<b>2.61</b>	<b>142</b>
<b>26/11/02</b>	<b>2.58</b>	<b>136</b>
<b>28/02/03</b>	<b>2.51</b>	<b>135</b>
<b>04/12/03</b>	<b>2.41</b>	<b>139</b>
<b>16/11/02</b>	<b>2.30</b>	<b>141</b>
<b>26/11/03</b>	<b>2.2</b>	<b>193</b>

Tabella 1: Elenco dei dieci eventi più gravosi registrati dalla boa ondometrica di Cagliari nel periodo 01/07/2001÷31/01/2004. La quasi totalità degli eventi ha provenienza dal settore sud-orientale

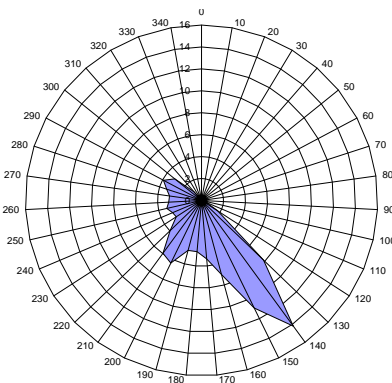


Figura 7. Diagramma polare della distribuzione degli eventi di moto ondo registrati dalla boa ondometrica in termini di percentuale di occorrenza. Fonte: APAT.

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10		0.02														0.02
20		0.03	0.02													0.05
30	0.02		0.03													0.05
40			0.03													0.03
50		0.03	0.02													0.05
60		0.03	0.05													0.08
70		0.05	0.03													0.08
80		0.02	0.02													0.03
90		0.06														0.06
100	0.02	0.16	0.03													0.20
110	0.06	0.24	0.14	0.02												0.46
120	0.25	0.9	0.47	0.09												1.71
130	0.74	2.78	3.36	0.58	0.27	0.09										7.82
140	1.92	4.1	5.31	1.87	0.63	0.19	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02					14.15
150	3.9	2.94	3.05	0.57	0.3	0.08	0.06	0.02								10.92
160	3.11	2.36	1.27	0.2	0.05											6.99
170	2.8	1.76	0.71	0.05	0.03											5.34
180	2.42	1.65	0.57	0.03	0.02											4.68
190	2.25	1.74	0.57	0.14		0.02										4.71
200	2.03	2.73	1.41	0.14	0.05											6.36
210	0.99	2.48	2.12	0.35	0.02											5.95
220	0.75	1.66	1.43	0.06	0.06											3.97
230	0.66	1.3	0.71	0.08												2.75
240	0.6	1.18	0.97	0.11												2.86
250	0.68	1.74	0.72	0.09												3.24
260	0.5	1.26	1.12	0.09	0.02											2.98
270	0.41	1.62	0.85	0.05												2.92
280	0.3	1.84	1.18	0.02												3.33
290	0.22	1.98	1.54	0.17												3.91
300	0.05	1.46	1.46	0.16												3.13
310	0.02	0.5	0.49	0.03												1.04
320	0.02	0.02	0.06													0.10
330	0.02	0.02														0.03
340																0.00
350																0.00
360	0.02	0.02														0.03
TOT.	24.71	38.65	29.72	4.9	1.43	0.38	0.14	0.03	0.02	0.02	0.02	100				100.00

Tabella 2: Rappresentazione sintetica delle distribuzione del regime meteo-marino registrato dalla boa ondometrica. Fonte dei dati: Apat- Nunziati ed al. (2004).

### 1.3.1.2 DATI DELL'ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA

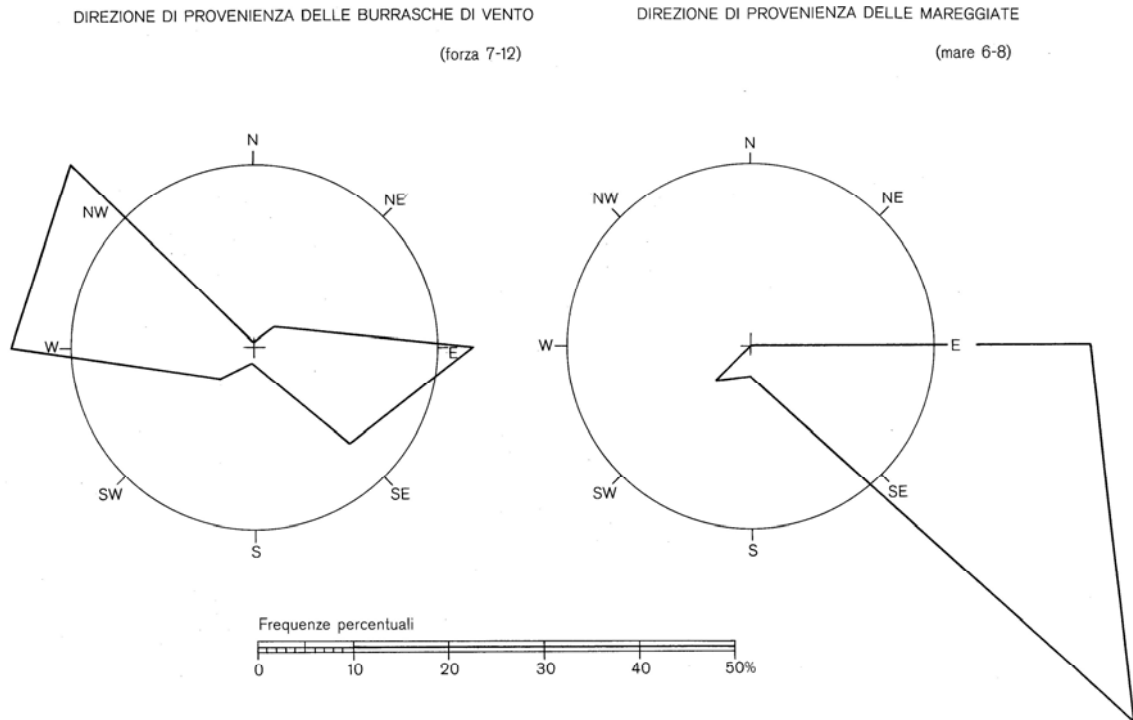


Figura 8: Rappresentazione sintetica del regime meteo-marino in base a dati osservati dalla stazione della Marina Militare. Periodo di osservazione: 1934÷1942; 1946 da Giu. a Dic.; 1947÷63; 1964 da Gen. a Mag, (fonte: Istituto Idrografico della Marina)<sup>14</sup>

La Figura 8 rappresenta l'analisi sintetica delle osservazioni compiute dalla non più attiva stazione semaforica di Capo S. Elia della Marina Militare. I periodi di osservazione di tali eventi sono stati i seguenti: 1934÷1942; 1946 da Giugno. a Dicembre; 1947÷63; 1964 da Gennaio a Maggio per un totale di 27 anni circa.

I dati riportati sono dati ricavati da osservazioni visive e quindi soggette ad errori di stima. Tuttavia, esse rispondono in maniera ottimale allo scopo del presente studio: le indicazioni ricavate confermano, per quel che attiene gli eventi di burrasca del mare, il dato registrato dalla boa.

### 1.3.1.3 DATI OSSERVATI UKMO

A completamento del quadro espongo in Tabella 3 i dati sintetici riferiti al settore sud della Sardegna. Essi rappresentano le percentuali di occorrenza degli eventi

<sup>14</sup> I.I.M. Istituto Idrografico della Marina, Il vento e lo stato del mare lungo le coste italiane e dell'adriatico, 1980.

osservati dalle navi in transito nel canale di Sardegna nel periodo 1948-1989 e raccolti dall'Istituto Meteorologico Britannico.

I dati sono certamente affetti da errori di stima dovuti a numerose cause (Tomasicchio U., 1998)<sup>15</sup>; tuttavia essi confermano la netta prevalenza del secondo quadrante quale principale settore di traversia.

DIR (°N)/Hs [m]	0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	>6.0	Totale
75 - 105	7.18	2.83	0.76	0.17	0.05	0.03	0.00	11.03
105 - 135	4.58	2.49	0.64	0.24	0.04	0.02	0.01	8.02
135 - 165	2.71	1.07	0.27	0.07				4.12
165 - 195	1.20	0.34	0.07	0.00		0.00		1.61
195 - 225	2.05	0.57	0.15	0.05	0.00			2.82
225 - 255	3.15	1.65	0.51	0.19	0.06	0.02	0.00	5.59

Tabella 3: Rappresentazione del regime ondoso a largo osservato del settore sud della Sardegna per le zone di interesse per la presente ricerca. In esso appare chiara la larga prevalenza degli eventi del 2° settore. Fonte dati: UKMO. Periodo di osservazione 1948-1989.

---

<sup>15</sup> Tomasicchio U, Manuale di Ingegneria Portuale e Costiera, BIOS, 1998

## 1.4 REGIME ANEMOMETRICO

Nella Figura 9 si riportano sinteticamente, in termini di occorrenza percentuale sull'anno, i dati registrati dalla stazione anemometria del Poetto in funzione dal 21/10/2002 al 27/07/2004.

Il regime anemometrico (vedi Tabella 4) risulta fortemente caratterizzato dalla concentrazione degli eventi lungo la direzione NE-SW. Gli eventi registrati a maggiore intensità sono quelli di Levante-Scirocco. I venti regnanti, caratterizzati da maggior frequenza di accadimento, sono quelli del quarto quadrante.

La Figura 10 rappresenta il clima registrato nella stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare di Elmas così come riportato nell'Atlante della Sardegna<sup>16</sup>. La comparabilità tra le due fonti è parziale; è vero infatti che si riscontra l'asse principale di flusso NW-SW, ma si nota anche la diversa forma della Rosa dei venti soprattutto nelle sue componenti di tramontana e mezzogiorno e nei valori di intensità.

Questo può essere dovuto alle inevitabili condizioni locali dovute all'orografia ed alle differenti altezze di acquisizione del dato.

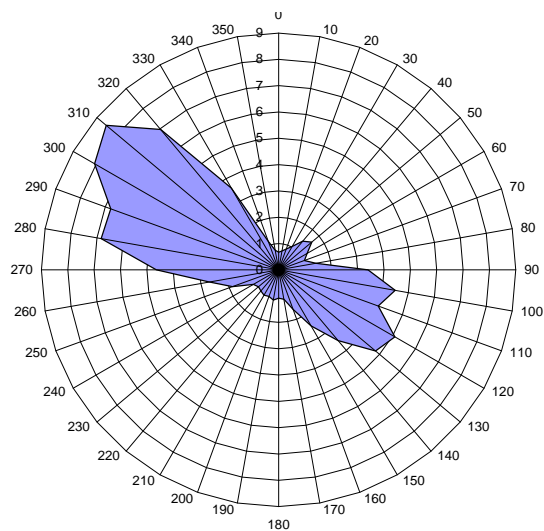


Figura 9: Diagramma polare delle percentuali di occorrenza del regime anemometrico registrato tra l'ottobre 2002 ed il luglio 2004 presso la stazione anemometrica posta al Poetto. Fonte: Nunziati ed al. 2004

---

<sup>16</sup> PRACCHI R., Atlante della Sardegna, Kappa, 1980



DIR (°N)	VELOCITA' DEL VENTO (nodi)											TOT.	
	1-4	4-7	7-11	11-17	17-22	22-28	28-34	34-41	41-48	48-56	56-63		>63
10	0,6	0,1	0,0										0,7
20	0,7	0,1	0,0										0,8
30	0,7	0,2	0,0										1,0
40	0,7	0,5	0,1	0,0									1,4
50	0,5	0,6	0,4	0,0	0,0								1,6
60	0,7	0,4	0,0										1,2
70	0,7	0,2	0,0										1,0
80	0,8	0,3	0,2	0,0									1,4
90	1,3	0,6	0,8	0,4	0,0	0,1	0,0						3,39
100	1,2	0,8	0,8	1,0	0,2	0,2	0,0						4,4
110	0,9	1,2	1,1	0,6	0,0								4,0
120	0,6	1,3	1,9	1,0	0,0								5,0
130	0,7	1,4	1,8	0,7	0,0								4,8
140	0,7	1,3	1,3	0,1									3,5
150	0,7	1,1	0,5	0,0									2,4
160	0,6	0,7	0,1										1,6
170	0,6	0,4	0,0										1,1
180	0,6	0,4	0,0										1,0
190	0,6	0,4	0,0										1,1
200	0,6	0,3	0,0	0,0									1,0
210	0,6	0,4	0,0										1,1
220	0,6	0,2	0,0										1,0
230	0,7	0,2	0,0										1,0
240	0,8	0,1	0,0	0,0									1,1
250	1,6	0,2	0,0										1,8
260	2,1	0,4	0,1	0,0									2,6
270	2,4	1,4	0,7	0,1									4,6
280	3,1	2,4	1,2	0,0									6,8
290	3,5	2,1	0,9	0,1									6,7
300	3,8	2,9	1,1	0,1									8,0
310	3,6	3,7	1,1	0,0									8,5
320	2,9	3,1	0,7	0,0									6,9
330	1,8	1,3	0,3										3,5
340	0,8	0,2	0,0										1,1
350	0,6	0,0	0,0										0,7
360	0,5	0,0	0,0										0,6
TOT	45,3	32,2	16,9	4,6	0,4	0,3	0,0						100,00
Tot. cumul.		77,60	94,5	99,1	99,6	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Tabella 4: Distribuzione annuale percentuale degli eventi anemometrici per classi di velocità e direzione di provenienza della stazione posta nello stabilimento balneare il Lido. Periodo di rilevazione 21/10/2002 ÷ 27/07/2004. (Fonte dati: Nunziati ed al., 2004, Tab.5 pag. 13)

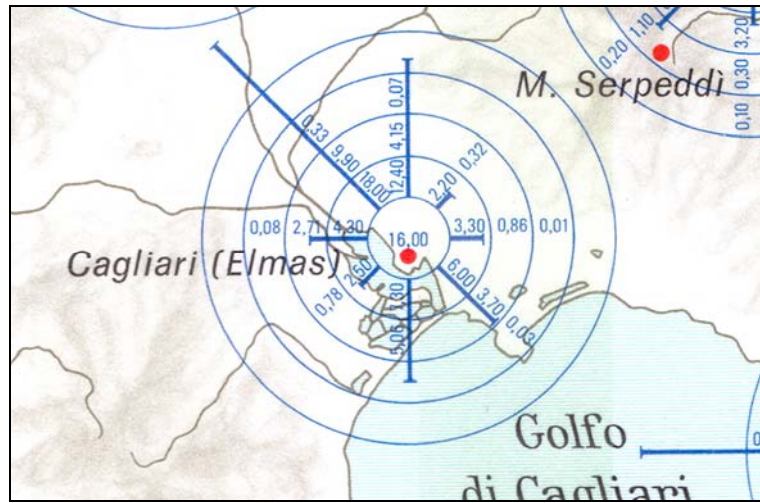


Figura 10: Regime anemometrico registrato nella stazione della aeronautica militare di Elmas. I dati sono riportati in termini di percentuali di occorrenza. I cerchi rappresentano le scale di velocità del vento: ogni cerchio 5 m/s. Riproduzione da “Atlante della Sardegna”

## 2 CAMPAGNE DI RILEVAMENTO E RICERCA BIBLIOGRAFICA DEI DATI DISPONIBILI

La disponibilità di dati affidabili è la base indispensabile per la comprensione di complessi fenomeni evolutivi. Di più. Le variazioni degli stessi parametri che dimostrino un ben definito trend su tempi medio/lunghi (dell'ordine degli anni) aiutano alla determinazione delle cause prime dei fenomeni monitorati ed aiutano a meglio pianificare le strategie future di intervento (Beachmed, 2004)<sup>17</sup>.

A tale scopo, nei quattro anni tra il 2004 ed il 2007 ho compiuto una serie di rilievi e campionamenti che potessero fornire, in maniera obiettiva e rigorosa, una solida base da cui poter dedurre il modello evolutivo in atto nella spiaggia del Poetto.

Essi, integrati con rilievi compiuti dalla Provincia di Cagliari nel programma di monitoraggio del Poetto<sup>18</sup>, i rilievi e i campionamenti condotti nell'ambito della ricerca di Lecca ed al.<sup>19</sup>, i dati raccolti nella ricerca bibliografica e storica su precedenti altri studi, costituiscono la base per lo studio geomorfologico. Il dato batimetrico è stato desunto dalla campagna idrografica *multibeam* effettuata nel gennaio 2004 dalla Martech Srl per conto della Compucart S.C. su incarico della Provincia di Cagliari, campagna alla quale ho partecipato in prima persona contribuendo in tutte le fasi (acquisizione, processamento dati e restituzione). Le linee di riva sono state rilevate con apposita campagna topografica da me compiuta negli anni 2005, 2006, 2007 con metodologia di rilievo GPS-RTK. I dati granulometrici 2005-2007 e sedimentologici 2007 sono stati rilevati in apposite campagne.

I paragrafi che seguono, illustrano le metodologie di rilievo utilizzate e se ne forniscono i risultati. Il Paragrafo finale, offre un quadro organico interpretativo dei fenomeni in atto sulla base delle risultanze oggettive riscontrate.

---

<sup>17</sup> AA. VV. ,2004- 3° Quaderno Tecnico (fase "c") BEACHMED

<sup>18</sup> Briganti R., Contini P., Franco L.- , (2004) MODIMAR - Rapporto n.1 – n.2 – n.3 . Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondametrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica. Studio volto per la Provincia di Cagliari

<sup>19</sup> LECCA L., DE MURO S. COSSELLU M. & PAU M., 2005 I sedimenti Terrigeno-Carbonatici attuali della piattaforma continentale del golfo di Cagliari, IL Quaternario 18(2), 2005. 201-221.

## 2.1 RILIEVO TOPOGRAFICO DELLA LINEA DI RIVA

Il rilievo topografico della linea di riva è stato da me effettuato in quattro campagne di misure tra il gennaio 2004 ed il 2007 con il metodo GPS-RTK ovvero GPS con correzione plano-altimetrica in tempo reale (**Global Positioning System – Real Time Kinematic**). Tale modalità di acquisizione mi ha consentito un'alta produzione giornaliera per punti battuti, senza per questo perdere in termini qualitativi. Recenti studi condotti dal Dipartimento di Scienze della Terra di Firenze<sup>20</sup> hanno confermato che tale metodologia è la più performante tra quelle esaminate per rilievi di media estensione in ambito costiero.

Per poter ottenere dei risultati confrontabili tra di loro, ho definito come linea di riva la isoipsa 0.00 m utilizzando come riferimento lo zero I.G.M., che per la Sardegna è stabilito come lo zero mareografico del porto di Cagliari (Resta, 1999)<sup>21</sup>. Il sistema di acquisizione, meglio descritto nel paragrafo che segue, è basato sull'utilizzo di due differenti ricevitori, ognuno dei quali riceve la posizione corrente in coordinate geografiche nel sistema geodetico WGS84. Uno di essi (*reference*), posto su un punto di coordinate note precedentemente calcolate, determina in continuo gli scarti  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  che istantaneamente si vengono a creare tra l'effettiva posizione del *reference point* ( $x_r, y_r, z_r$ ) e quella fornita dai satelliti a seguito di varie cause, (cattiva configurazione della costellazione dei satelliti, rallentamento della velocità del segnale dovuto all'attraversamento della ionosfera ecc.). Una volta determinati gli scarti, che saranno ovviamente legati ad un particolare istante, vengono trasmessi all'altra stazione (*rover*) che depura il dato sulla base delle correzioni ricevute. La condizione implicita del ragionamento è gli errori tra le due stazioni siano sostanzialmente identici. L'accuratezza della misura è ottima per distanze inferiori ai 10 km tra le due stazioni. Tale precisione varia a seconda delle modalità di rilievo (statico, dinamico).

Al fine di ottenere un quadro più completo delle dinamiche in atto ed estrapolarne le tendenze evolutive in maniera univoca, ho svolto un lavoro di ricerca bibliografica con il quale mi è stato possibile ricostruire la linea di riva del 1998, precedente

---

<sup>20</sup> AA. VV., 2004, Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione della spiaggia, Dipartimento di Scienze della Terra, Regione Toscana, 3° Quaderno Tecnico Beachmed

<sup>21</sup> Resta F., a.a. 1998/1999, Appunti di Topografia

l'intervento di rinascimento del 2002, quella del 1943 e quella del 1899. La linea di riva del 2002 è stata rilevata con un rilievo effettuato con stazione totale, nell'ambito del progetto citato.

Le linee di riva del 1943 e 1899 sono invece estrapolate rispettivamente da una foto aerea della *Deutsche Luftwaffe* (Ritossa, 2004) e dalla carta IGMI 1899. Queste ultime due linee non sono evidentemente omogenee con le altre, sia per metodi di rilevamento sia per mutate condizioni al contorno. Anche se non determinanti al fine di un ragionamento rigoroso, esse sono state incluse per completezza di rappresentazione

### 2.1.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DGPS

Il GPS o sistema globale di posizionamento, è basato su costellazione di 24 satelliti che orbitano ad altissima quota attorno alla terra, ad un'altezza di circa 20.200 km.

Il principio su cui il sistema si basa è concettualmente molto semplice: esso consente di determinare la posizione di un qualsiasi punto della superficie terrestre calcolando la distanza fra la posizione del ricevitore ed un determinato numero di satelliti disponibili in quel determinato istante fra quelli della costellazione in orbita intorno alla terra (Secchia<sup>22</sup>, 2005). La comunicazione dei segnali GPS tra satelliti e ricevitore avviene attraverso onde radio che nel caso dei GPS geodetici sono 2, entrambe multiple di una frequenza fondamentale ( $f_0 = 10.23$  MHz). In particolare la frequenza portante L1 è pari a 154 volte la frequenza principale, la L2 è pari a 120 volte la  $f_0$ .

La determinazione vera e propria delle distanze può avvenire o utilizzando il tempo di percorrenza del segnale, o attraverso l'osservazione della fase del segnale.

Nel primo caso, la determinazione avviene in tempi rapidi, ed è basata sul vero e proprio calcolo delle distanze tra satelliti e ricevitore, noti gli istanti di partenza, arrivo del segnale e velocità della luce (pseudodistanze). Nel secondo caso, la determinazione delle distanze avviene mediante l'osservazione della fase del segnale. Come si può facilmente intuire, in questo ultimo caso, quando il ricevitore GPS riceve le serie di onde è in grado di misurare una porzione d'onda in arrivo ma non

---

<sup>22</sup> SECCHIA M., 2005. GPS – Guida all'uso del GPS per il rilevamento del territorio e l'aggiornamento cartografico. – ASSOGEO – TRIMBLE- Maggioli editore

può dire quante onde intere sono state emesse dal momento in cui quel segnale è stato emesso a quello in cui è stato ricevuto. Il calcolo dell'*integer ambiguity*, ovvero del numero intero di onde. Quest'ultimo è il metodo di rilevazione è il più preciso.

Il sistema geodetico adottato per il GPS, come anticipato nel paragrafo precedente, è il sistema convenzionale terrestre WGS84.

Un ricevitore GPS è in grado di determinare la sua posizione assoluta calcolandola in base ai segnali forniti dai satelliti. Tuttavia, la precisione ottenuta ( $\pm 5$  m) non è sufficiente per le applicazioni topografiche ove si richiedono precisioni centimetriche.

In queste applicazioni vengono utilizzati due ricevitori. La precisione del vettore che unisce due ricevitori (*baseline*), infatti, è di gran lunga più precisa delle posizioni assolute che ogni ricevitore fornisce singolarmente.

La procedura GPS per lo svolgimento di questo tipo di rilievo è detta a GPS differenziale.

Nel caso di modalità DGPS (*differential GPS*), il calcolo di ciascuna base viene compiuto per successive differenze delle equazioni di osservazione mediante le quali vengono iterativamente ridotte o rimosse molte delle incertezza dovuti ai satelliti e ricevitori. Il rilievo differenziale può essere compiuto in differenti modalità, a seconda delle quali si definisce *statico* o *dinamico*.

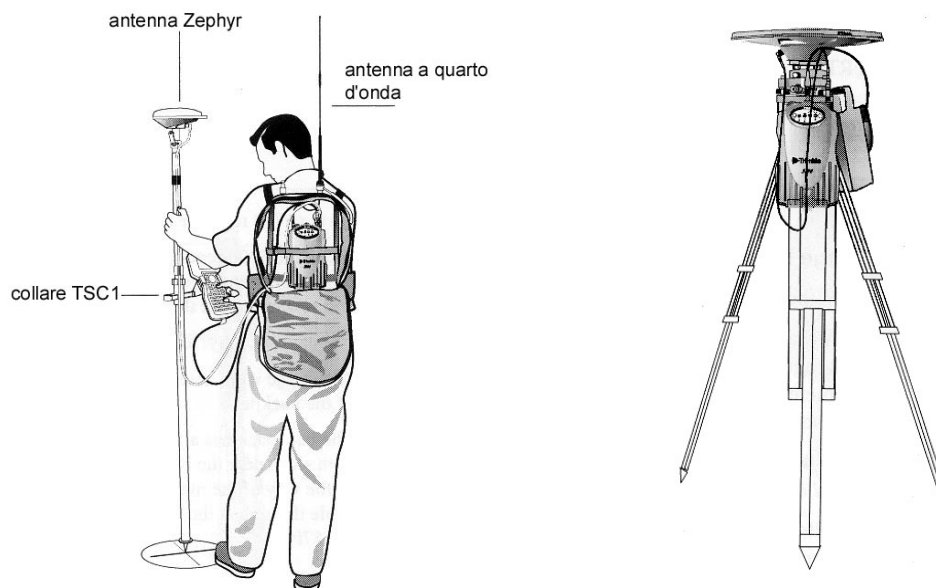


Figura 11: a destra, utilizzo a spalla del ricevitore rover; a sn, posizionamento stazione reference. foto. Trimble

I rilievi differenziali in modalità statiche, come suggerisce la stessa denominazione, prevedono la staticità delle due stazioni di rilievo per un determinato periodo di tempo. Le procedure dinamiche contemplano lo spostamento del ricevitore durante la sessione di acquisizione per aumentare la produttività di rilievo.

Ovviamente la prima modalità è più precisa ( $\pm 0.5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times \text{lunghezza della baseline}$ ) della dinamica ( $\pm 2 \text{ cm} + 2 \text{ ppm} \times \text{lunghezza baseline}$ ). Per lo scopo della presente tesi, come in genere avviene per i rilievi di campagna non dedicati alla determinazione di capisaldi di rilevamento, si utilizza la modalità dinamica.

Come già accennato in premessa, il rilievo è stato eseguito in modalità GSP-RTK. Che prevede l'impiego di ricevitori a doppia frequenza collegati fra loro via modem GPRS e comandati da un TSCE.



Figura 12: collegamento GPS Rover con modem GPRS per consentire la comunicazione tra le due stazioni.

Uno di essi, posto su un punto di coordinate note, consente la determinazione delle reciproche distanze dopo aver avviato la procedura di inizializzazione del sistema che avviene *On The Fly*, ovvero anche durante gli spostamenti purchè vi siano "agganciati" almeno 4 satelliti per ricevitore.

I ricevitori utilizzati durante tutti e 4 i rilievi sono stati i GPS 5700 della TRIMBLE

Posizionamento	Modalità	Latenza	Precisione Orizzontale (RMS)	Precisione Verticale (RMS)
RTK (OTF)	Sincronizzata	> 100 ms	1 cm + 1 ppm (x lunghezza linea di base)	2 cm + 2 ppm (x lunghezza linea di base)

Tabella 5: caratteristiche tecniche di precisione del sistema GPS-RTK TRIMBLE.

## 2.1.2 METOLOGIA DEL RILIEVO E RESTITUZIONE CARTOGRAFICA

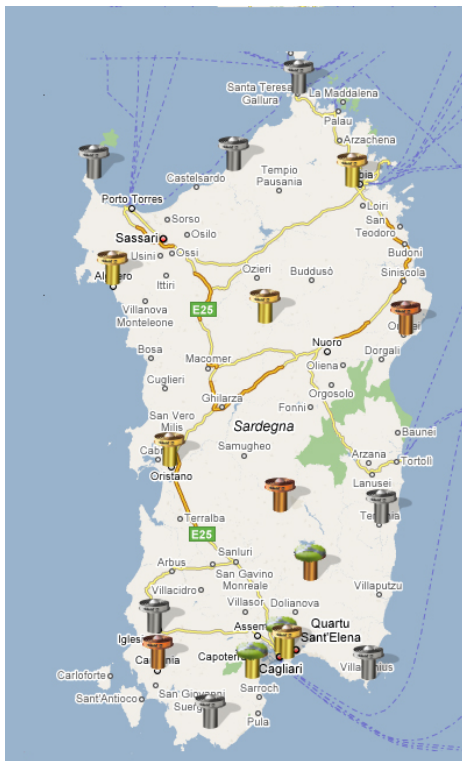


Figura 13: visualizzazione della rete GNSS attiva in Sardegna. (foto topografia.unica.it)

Le varie fasi del rilevamento sono state pianificate in modo da consentire la ripetibilità e confrontabilità dei rilievi. A tale scopo si sono utilizzati la stessa strumentazione e lo stesso *reference point* appartenente alla rete GNSS (Figura 13) istituita in collaborazione tra l'Università di Cagliari e la rete SardiniaIT.

La stazione della rete SardiniaIT utilizzata per i rilievi è ubicata nella zona di Via Forlanini ( $\varphi$ : 39.208679  $\lambda$ : 9.135443) ovvero in un raggio operativo ottimale della *baseline*.

Le modalità operative del sistema RTK, permettono di leggere, in tempo reale, la quota di riferimento della linea di riva.

Per una maggiore precisione ho effettuati il rilievo battendo coppie di due punti intervallati di 20 m, il primo posto al di sotto della linea apparente di riva, il secondo al di sotto.

Restituito il rilievo secondo la procedura di seguito descritta, ho potuto definire i punti sulla battigia, uno al di sopra di 1.m., l'altro al sotto, consentendo l'individuazione dello 0 s.l.m. interpolazione. Ho quindi proceduto alla estrazione del dato impiegando il software dedicato della TRIMBLE, Trimble Total Control (vedi



Figura 14) che consente l'elaborazione dei dati raccolti e immagazzinati in apposite flash cards.

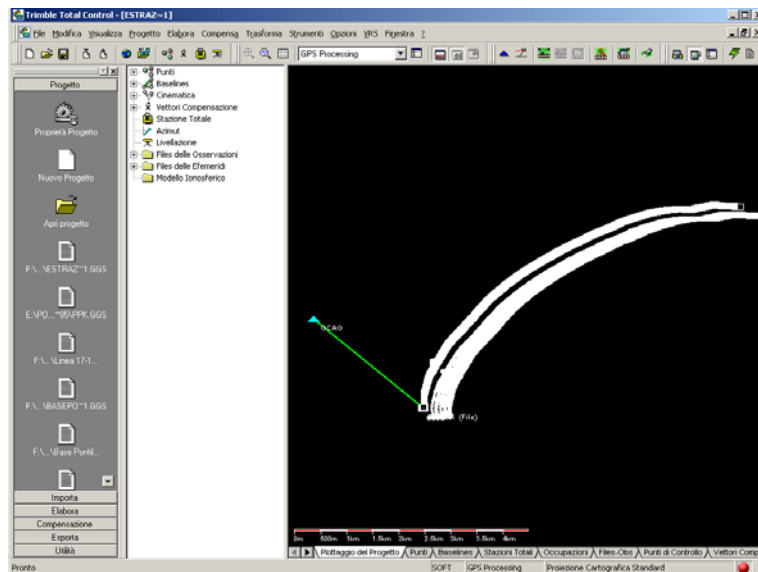


Figura 14: visualizzazione della restituzione del rilievo attraverso il Software Trimble Total Control.

Come già detto, il sistema geodetico di acquisizione è stato il WGS84.

Per consentire la trasformazione tra il sistema GPS e quello locale ho fatto ricorso al software VERTO2 dell'Istituto Geografico Militare Italiano (Figura 15). Tale software consente la conversione di punti singoli o set di file opportunamente impostati, tra i diversi sistemi di riferimento.

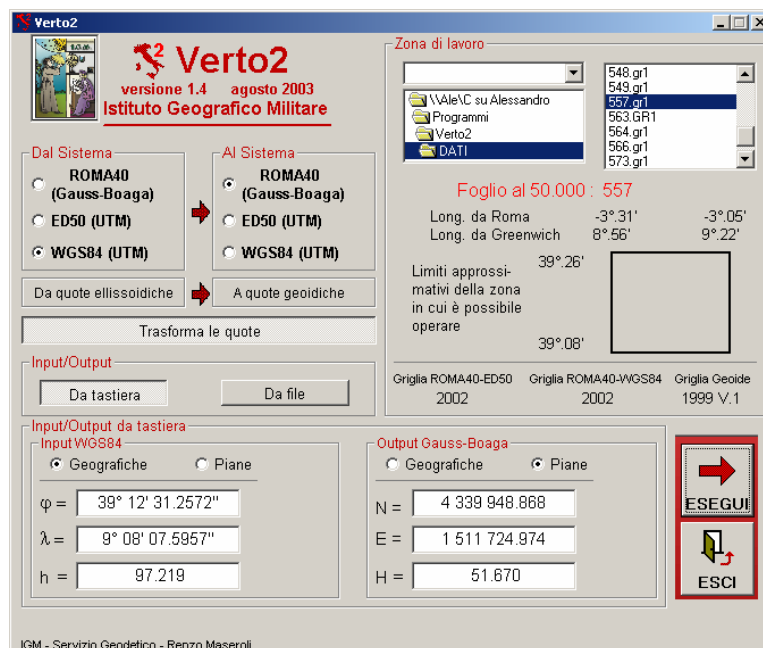


Figura 15: visualizzazione della trasformazione di un punto attraverso il Software dedicato dell'IGMI.

I punti ottenuti sono stati trasformati sia in quota che in planimetria, garantendo la riduzione ad altezza geoidica dei punti rilevati.

La trasformazione, di per sé portatrice di errori nella determinazione della quota di circa  $\pm 0.08\text{m}$ , ha garantito la ripetibilità e confrontabilità delle misure poiché l'oscillazione ellissoidica applicata nelle trasformazioni è la medesima per i 4 rilievi.

Ho compiuto i rilievi in periodo estivo, ad eccezione del rilievo 2004, eseguito a gennaio del 2004.

Una volta restituiti e traslati i punti nel sistema locale GAUSS-BOAGA fuso ovest, ho importato i punti in ambiente CAD-GIS per l'effettiva restituzione della linee di riva.

Ho così ricostruito, impostandole su differenti *layer*, le linee di riva degli anni 2004, 2005, 2006, 2007 per unione dei punti posti a quota 0.00 m, ottenuti come spiegato precedentemente.

### 2.1.3 RISULTATI ED ANALISI COMPARATA TRA I RILIEVI

La restituzione in ambiente GIS mi ha permesso di procedere ad una valutazione oggettiva dei fenomeni di avanzamento ed arretramento della linea di riva.

Confrontando puntualmente tutta la falciata del Poetto, ho ricostruito la tendenza evolutiva della linea di riva a partire dal 1899. Come detto in premessa, pur rappresentando anche i risultati per le linee del 1899 e 1943, per una analisi delle dinamiche in atto sono state considerate solo quelle del 1998, 2002, 2004, 2005, 2006 e 2007.

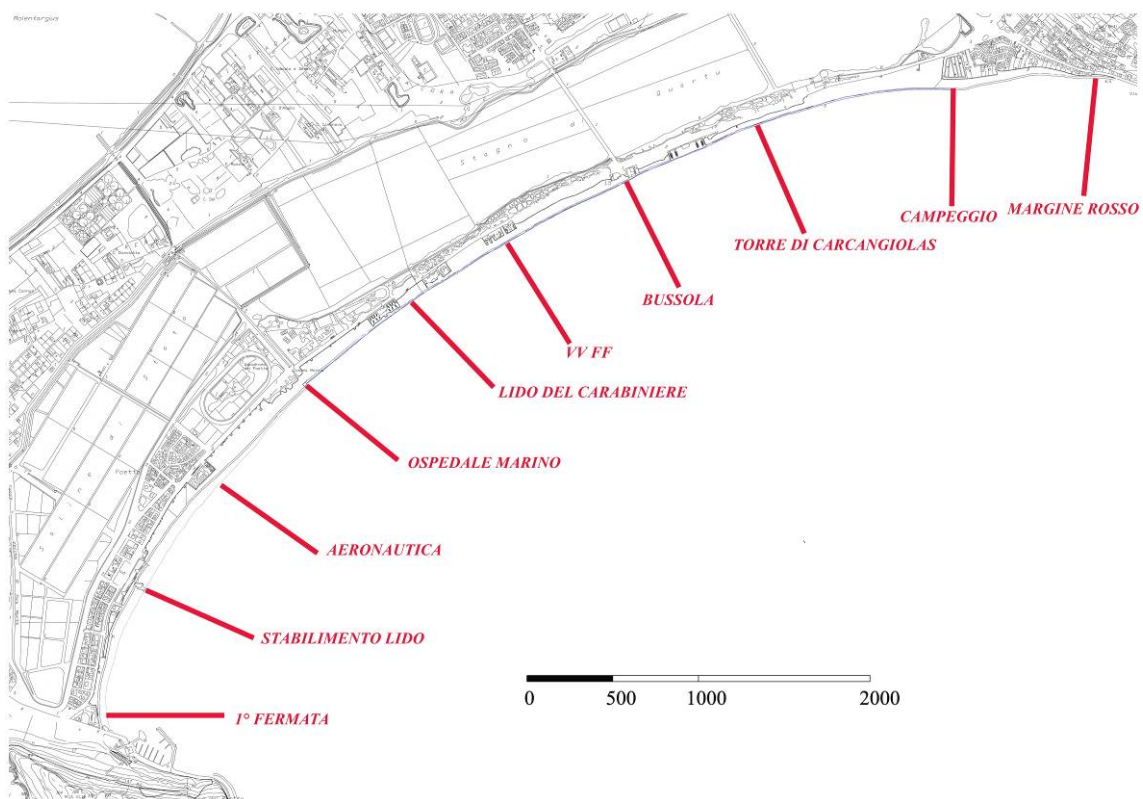


Figura 16: Ubicazione delle principali località citate.

Rispetto al rinascimento, avvenuto nel 2002, la linea di costa 1998 (dai rilievi CTR) è precedente, la 2002 è stata rilevata subito dopo e le altre 4 sono naturalmente successive.

Per consentire una rappresentazione rapida dei risultati, ho riportato di seguito dei diagrammi che danno ragione della tendenza evolutiva delle linee di riva dal passato ad oggi, prendendo a riferimento la linea attuale (2007) rispetto a 10 sezioni (vedi Figura 16). La rappresentazione degli avanzamenti ed arretramenti misurati nelle

sezioni è fatta utilizzando le barre blu per gli arretramenti e le rosse per gli avanzamenti. La Figura 17, ad esempio mostra che la linea di costa attuale è avanzata rispetto alla linea 1899 di 27 m (rosso). Parimenti, sempre nella stessa figura, si vede che la linea di riva attuale è in arretramento rispetto alla linea del 2004 di 14 m (colore blu). I diagrammi si riferiscono a 10 punti campione riportati in Figura 16. La Figura 27 e la Figura 28 mostrano in maniera sintetica gli avanzamenti (in verde) e gli arretramenti (in rosso) rispettivamente per i periodi 2002÷2004 e 2004÷2007.

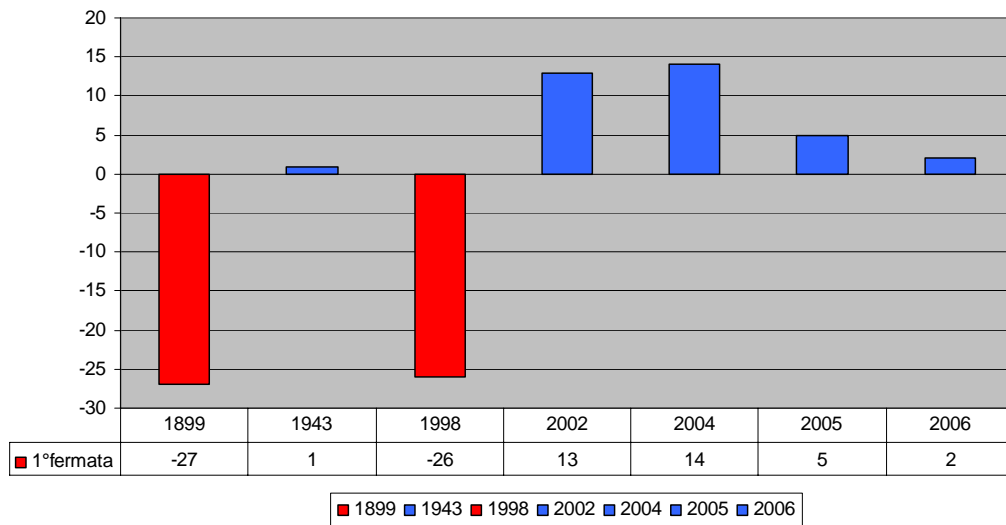


Figura 17: 1° Fermata. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

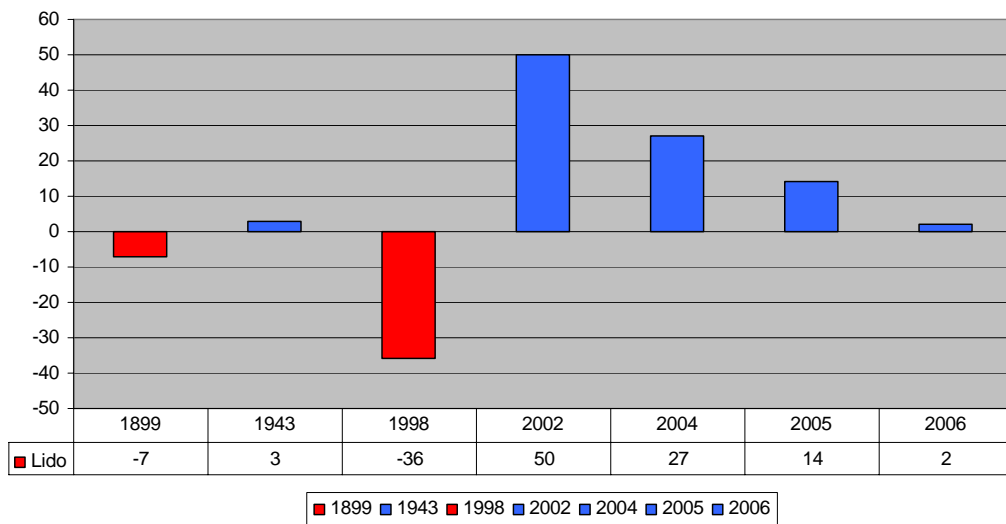


Figura 18: Stabilimento Balneare Lido. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

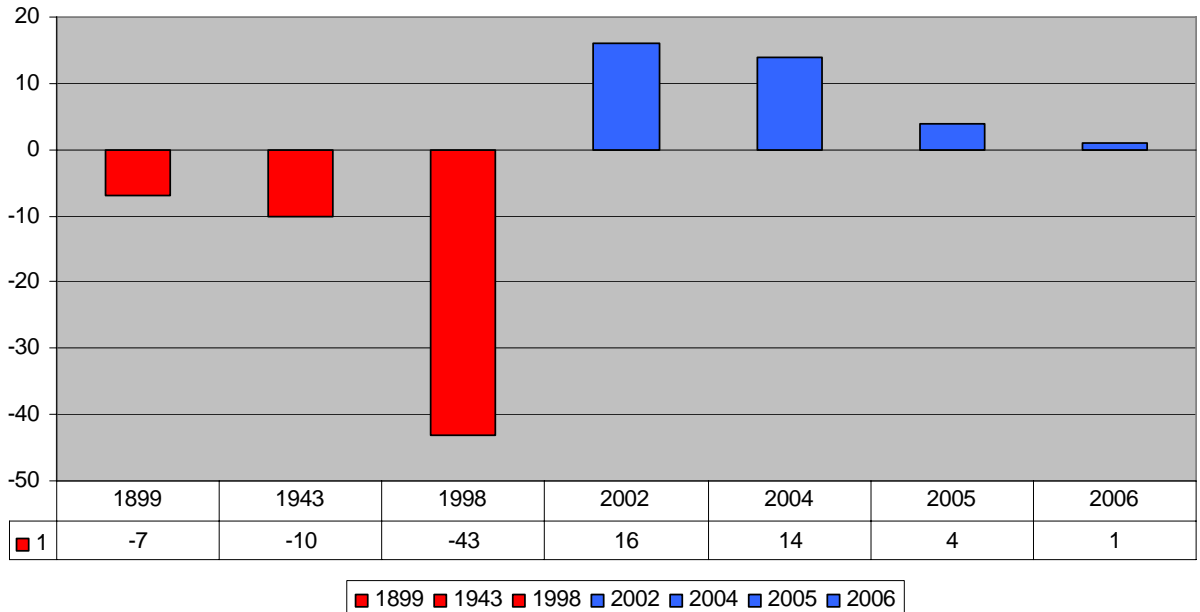


Figura 19: Stabilimento balneare Aeronautica. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

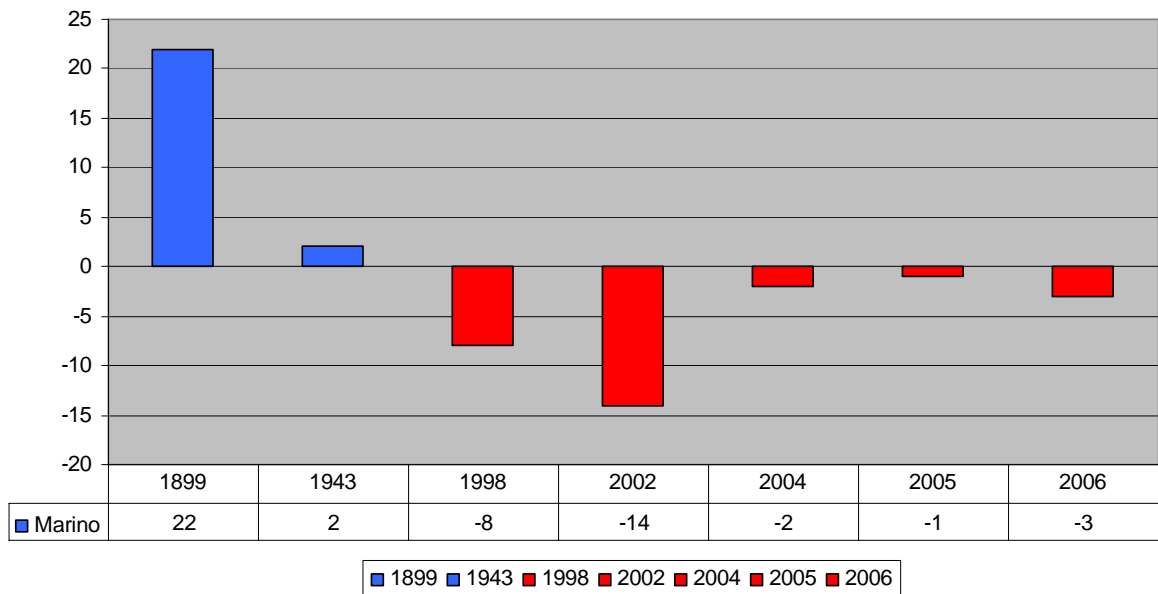


Figura 20: Ospedale Marino. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

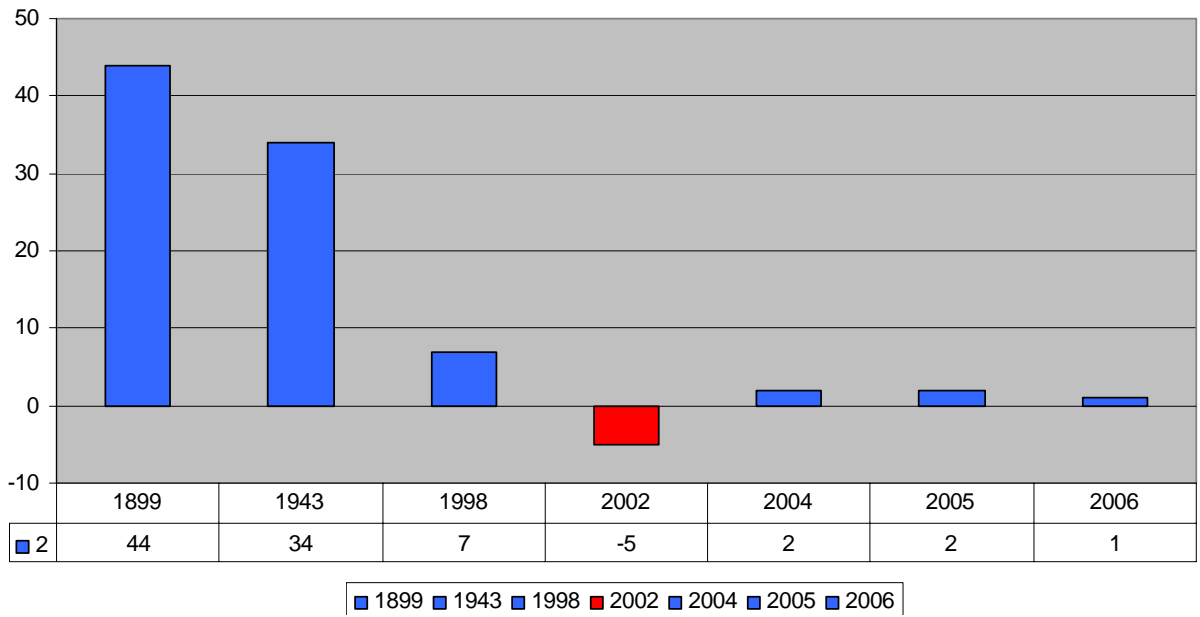


Figura 21: Lido del Carabiniere. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

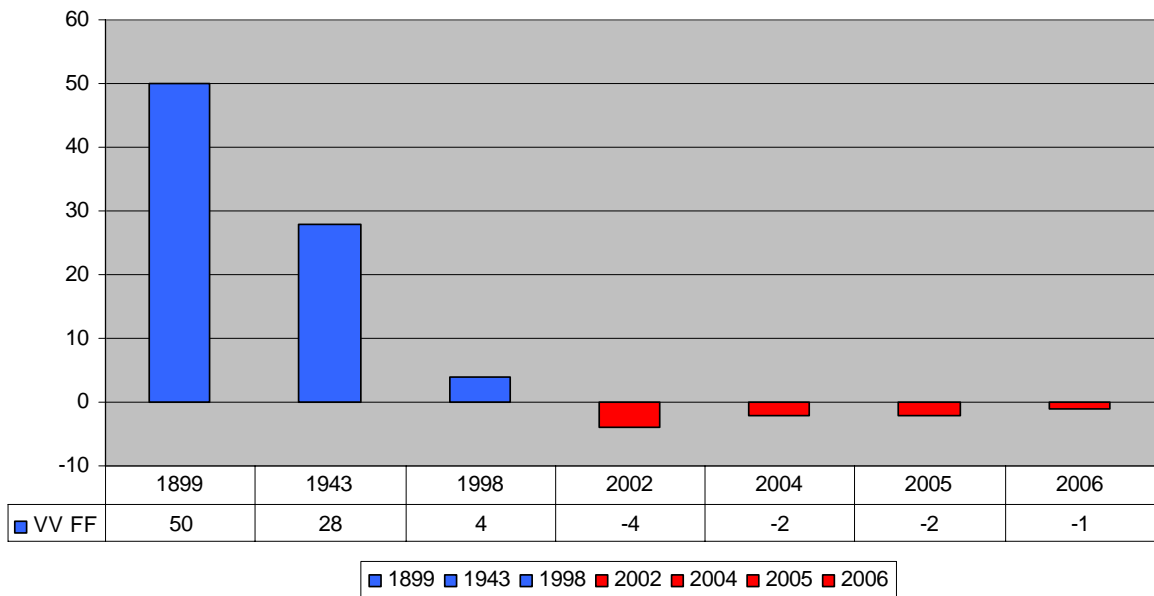


Figura 22: VVFF. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

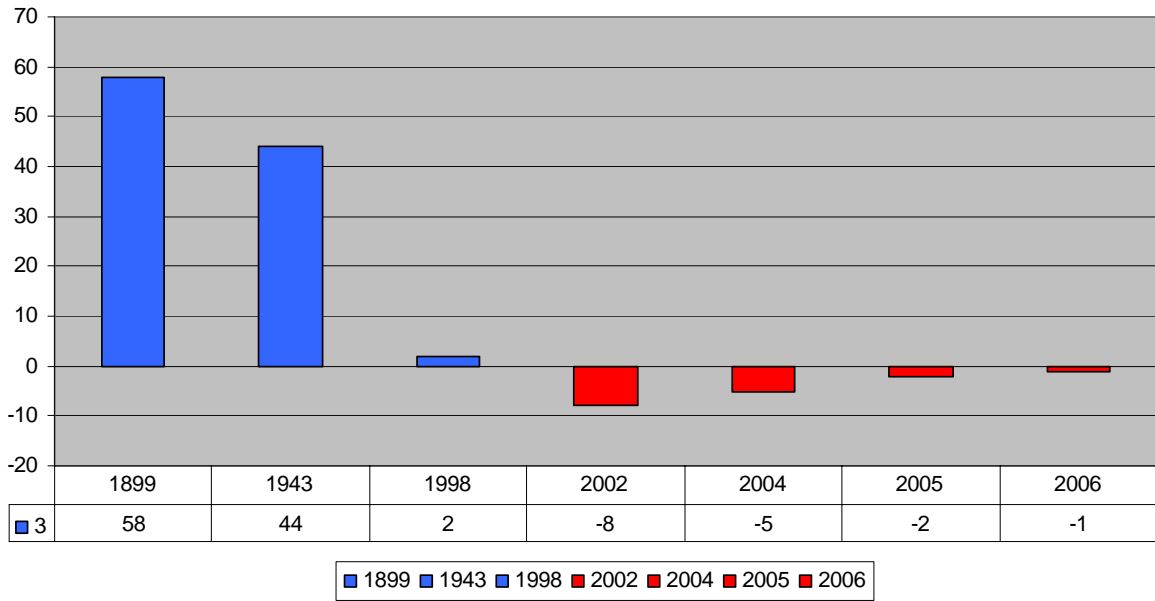


Figura 23: Bussola. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

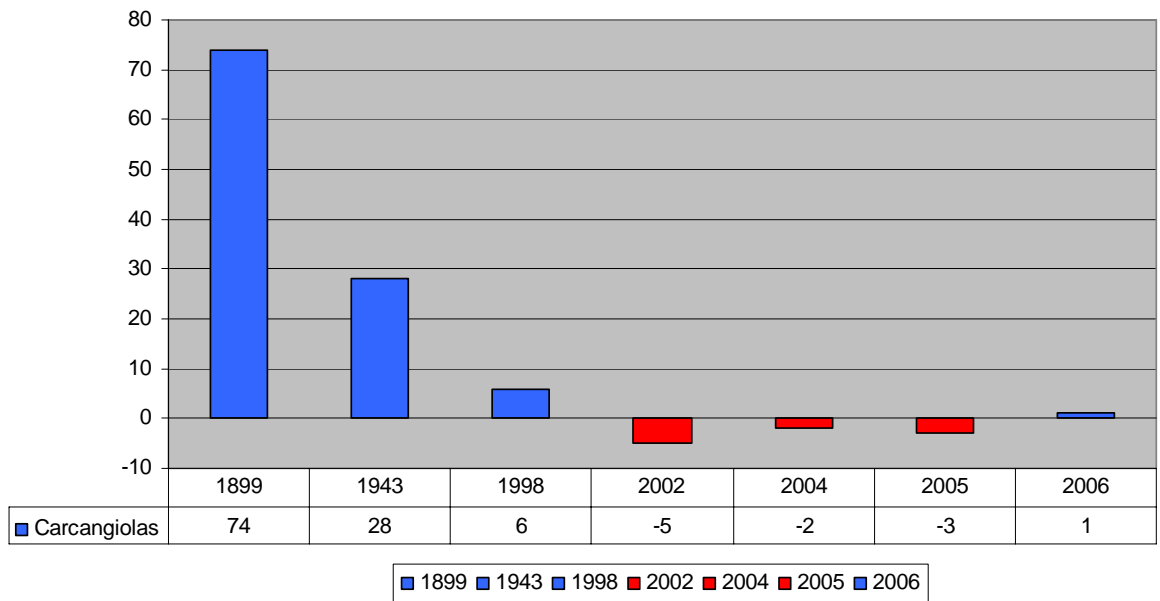


Figura 24: Torre di Carcangiolas. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

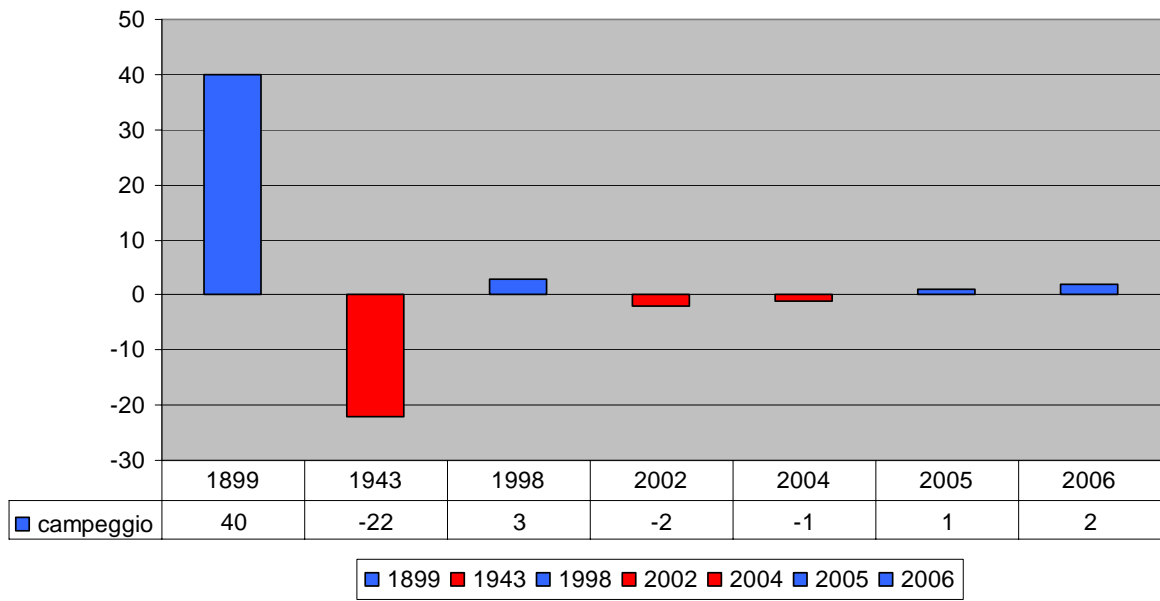


Figura 25: Campeggio. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.

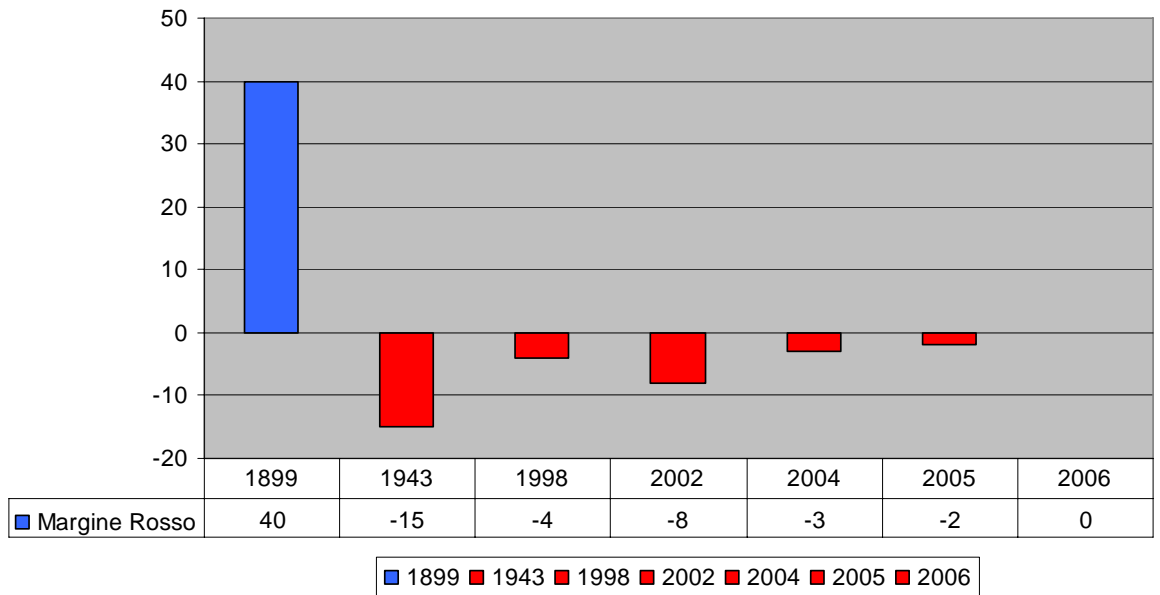


Figura 26: Margine Rosso. Rappresentazione degli arretramenti e/o avanzamenti della linea di riva nel tempo con riferimento alla linea di costa attuale: in rosso, la linea di riva attuale è avanzata rispetto all'anno considerato; in blu, la linea di riva attuale è arretrata rispetto a quella considerata.





Figura 27: Rappresentazione sintetica degli avanzamenti (in verde) e degli arretramenti (in rosso) registrati tra il gennaio 2004 ed il settembre 2007. Le distanze degli arretramenti/avanzamenti della linea di riva sono stati esaltati con fattore 10 al fine di una più efficace rappresentazione.

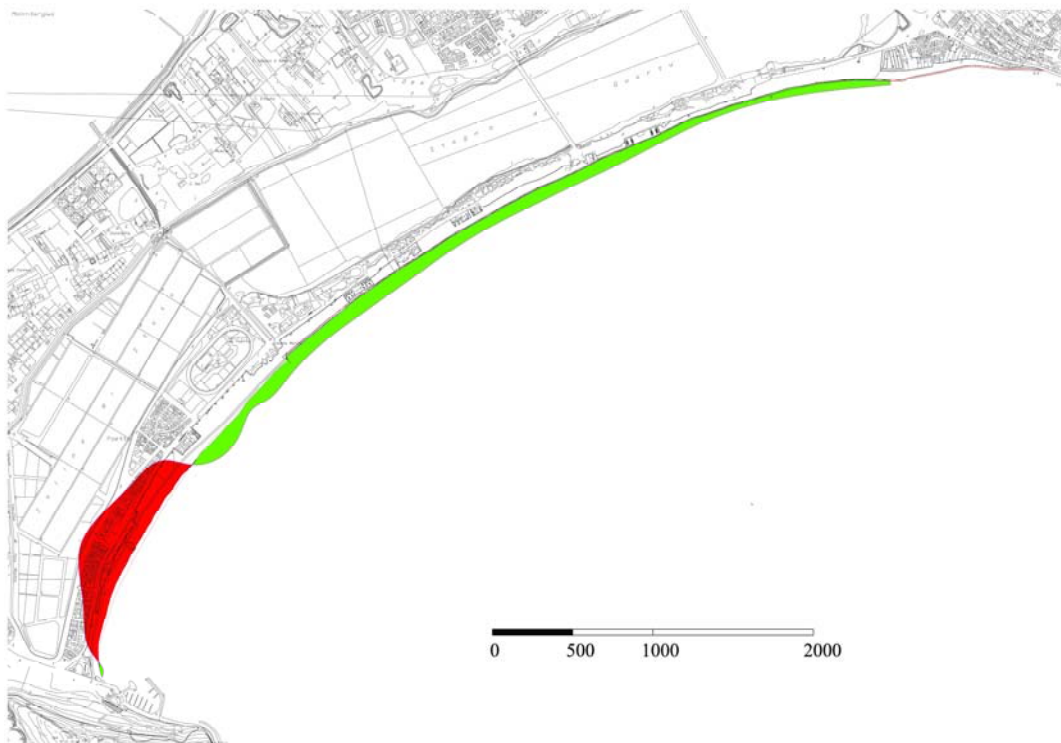


Figura 28: Rappresentazione sintetica degli avanzamenti (in verde) e degli arretramenti (in rosso) registrati tra il marzo 2002 ed il gennaio 2004. Le distanze degli arretramenti/avanzamenti della linea di riva sono stati esaltati con fattore 10 al fine di una più efficace rappresentazione.

La comparazione dei rilievi ottenuti mostra un chiaro e netto arretramento della linea di riva nel tratto di spiaggia interessato dal ripascimento.

In questa zona, evidenziata in rosso, si registrano degli arretramenti che raggiungono punte di 50 m se paragonate alla situazione post-ripascimento. Allo stesso tempo, si registra un avanzamento della linea di riva abbastanza generalizzato lungo la restante parte dell'arenile a partire dalla zona dell'Ospedale Marino. Negli ultimi tre anni i ratei annui di avanzamento/arretramento hanno subito un progressivo rallentamento: lo si può notare dalla differenza relativa di altezza tra le barre nelle figure.

Se inizialmente il rateo annuo d'erosione nella parte occidentale del Poetto era dell'ordine delle decine di metri, oggi esso è abbondantemente sotto i dieci metri con ratei annui di circa 2÷3 m.

Nella parte del litorale che parte dall'ospedale marino, si assiste ad un lento avanzamento della linea di riva con locali fenomeni erosivi da un anno all'altro. Le entità di questi avanzamenti sono spesso sub-metrici e quindi, a seconda degli anni, difficilmente apprezzabili.

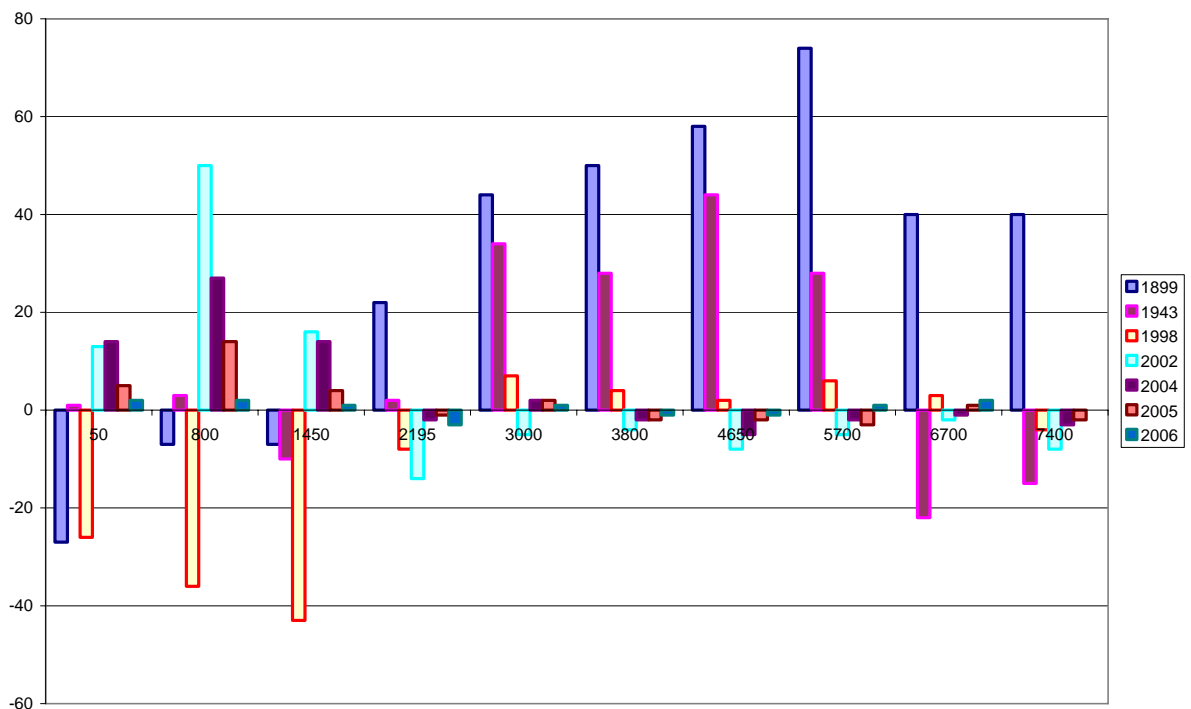


Figura 29: Rappresentazione sintetica dell'evoluzione della linea di riva lungo l'intera falcata del Poetto. In ascisse, la distanza orizzontale progressiva dall'inizio della spiaggia (da Marina Piccola verso il Margine Rosso). In ordinate: valori di avanzamento (valori negativi) ed arretramento (valori positivi), della linea di riva attuale (2007) rispetto all'anno di riferimento. Es. in corrispondenza del Lido (coordinata x=800 m ) la linea di riva attuale è arretrata di ~ 50 m (colonna celeste) rispetto al 2002 (situazione post ripascimento).

## 2.2 RILIEVO BATIMETRICO

I dati batimetrici utilizzati per la presente ricerca, sono stati rilevati nella campagna idrografica svolta dalla Martech Srl su affidamento della Compucart di Cagliari per incarico della Provincia, campagna alla quale ho personalmente partecipato con l'incarico di responsabile dei sistemi di acquisizione multibeam.

Il sistema integrato per rilievi idrografici utilizzato per l'esecuzione dei rilievi batimetrici del Poetto è stato basato sulla combinazione di diversi componenti, fra i quali il sonar tipo *multibeam*, può essere considerato il più importante e rappresentativo della tipologia del rilievo, poiché esso gerarchizza l'intero sistema e caratterizza il tipo di procedura del rilevamento. Il sonar (*sound navigation and ranging*) identifica una categoria di apparati in grado di rilevare la posizione di oggetti sommersi sfruttando il principio di riflessione delle onde acustiche, secondo lo stesso principio con cui il radar (*radio detection and ranging*) è in grado di individuare la posizione di oggetti nello spazio sfruttando le onde elettromagnetiche.



Figura 30: raffigurazione schematica di una "spazzata" multibeam: essa consente l'acquisizione contemporanea di più dati batimetrici permettendo una copertura totale del fondale. (fonte: geoinformatics)

La differenza fondamentale tra un sistema *multibeam* (multifascio) ed un tradizionale ecoscandaglio idrografico *singlebeam* (monofascio) sta nel fatto che lo strumento tradizionale invia, ogni frazione di secondo, un unico impulso acustico al fondale fornendone istantaneamente la profondità zenitale al di sotto dell'imbarcazione mentre il *multibeam* (più raggi) interpreta il segnale acustico di ritorno istantaneamente su diverse direzioni disposte con apertura angolare, rilevando pertanto una striscia di fondale di larghezza variabile secondo le caratteristiche dello strumento e della profondità. Si tratta di una tecnologia che si è sviluppata negli ultimi 25 anni per applicazioni nel settore delle ricerche oceanografiche *offshore*, soprattutto per la ricerca di giacimenti di idrocarburi e gas negli oceani, e che recentemente, grazie ad un notevole abbattimento dei costi, trova applicazioni importantissime nei monitoraggi e rilievi ambientali anche in ambito costiero e portuale. Nei paesi del nord Europa, con grande tradizione negli studi meteo-marini delle zone costiere, tale tecnologia viene ormai da qualche anno normalmente utilizzata nei progetti di monitoraggio ambientale delle spiagge. Il sistema operante con tale tecnologia consente di ottenere una notevolissima sicurezza ed affidabilità dei dati, consentendo il 100% di copertura dei fondali o delle strutture sommerse da rilevare con una risoluzione di immagine impossibile con altre modalità.

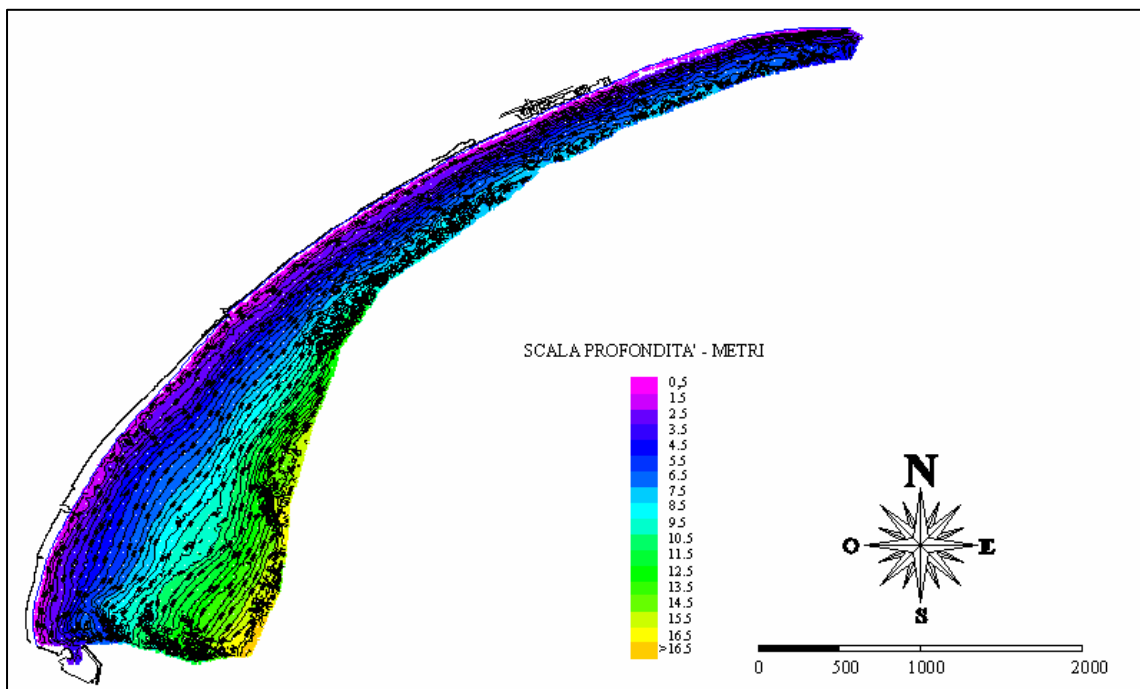


Figura 31: Restituzione grafica della batimetria dopo la fase di post-processing dei dati rilevati

### **2.3 ANALISI GRANULOMETRICHE E COMPOSIZIONALE**

Per poter meglio definire il quadro evolutivo in atto lungo il litorale del Poetto, nel 2007 ho compiuto una serie di campionamenti superficiali lungo tutta la lunghezza della spiaggia, in corrispondenza della battigia (vedi Figura 33).

Le modalità e le tecniche con cui ho eseguito le analisi sono quelle sviluppate all'interno del Dipartimento di Scienze della Terra di Cagliari perché i miei dati potessero essere confrontati con quelli del campionamento e delle analisi sedimentologiche effettuati nel Golfo di Cagliari nel 2003 da Lecca ed al.<sup>23</sup> di quel Dipartimento.

Nel quadro complessivo dei punti del Golfo da loro esaminati ho registrato che 6 ricadono all'interno dell'area oggetto della mia ricerca.

Nei successivi paragrafi si espone in dettaglio la procedura seguita per il raggiungimento dei risultati.



Figura 32: foto del campione P01 visto al microscopio binoculare. Ingrandimento 20x

---

<sup>23</sup> LECCA L., DE MURO S. COSSELLU M. & PAU M., 2005. I sedimenti Terrigeno-Carbonatici attuali della piattaforma continentale del golfo di Cagliari, *IL Quaternario* 18(2). 201-221





Figura 33: ubicazione dei prelievi di sedimento svolti. In rosso, quelli della campagna 2007 da me svolta, in giallo, distinti dalla lettera Rc, quelli compiuti durante la campagna 2003 (Lecca, De Muro, Cossellu & Pau).

### 2.3.1 GRANULOMETRIE



Figura 34: (Immagine rappresentante la batteria dei setacci inseriti nella macchina di agitazione meccanica. foto Longhitano)

Per le analisi granulometriche e sedimentologiche dei campioni di sabbie prelevati ho adottato la seguente procedura standard:

- Lavaggio per l'eliminazione dei sali marini
- Essiccazione in forno a 100°C per 24h
- Quartatura
- Pesatura con bilancia di precisione
- Catalogazione e conservazione del materiale non sottoposto ad analisi
- Posizionamento del materiale nella batteria dei setacci
- Agitazione meccanica dell'intera batteria attraverso apposito macchinario
- Pesatura, catalogazione e archiviazione per classi granulometriche dei grani.
- Determinazione e restituzione delle curve granulometriche

I campioni sono stati suddivisi in 7 classi con intervalli interi di unità  $\Phi$  tra 2000 e 63  $\mu\text{m}$ . Per ogni campione è stata realizzata la curva di frequenza, utilizzata nella valutazione percentuale delle varie tipologie di granuli, e la curva cumulativa mediante la quale è stata calcolato il coefficiente di cernita ( $\sigma\Phi = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2$ , INMAN, 1952; tab.1).

### 2.3.2 ANALISI COMPOSIZIONALE

Per la definizione della granulometria e della composizione dei campioni di sedimenti sabbiosi prelevati si è seguito il metodo semi-quantitativo, adottato dal Dipartimento di Scienze della Terra. Esso consiste nel riconoscimento delle diverse componenti al microscopio binoculare (Figura 35), che mediante comparatori per stima visiva (BACELLE & BOSELLINI, 1965; SWANSON, 1985) permette di valutare anche le loro percentuali areali. Vista la varietà delle componenti e la taratura dei comparatori ogni 5÷10 %, i risultati ottenuti sono soggetti ad errori dell'ordine del  $\pm 10$  % per singola componente.

Le diverse macrofamiglie dei sedimenti sono state determinate in base caratteri morfologici, al colore e al comportamento all'attacco di acido cloridrico diluito.

Per valutare l'importanza delle varie componenti, le stime areali sono state moltiplicate per il peso di ciascuna frazione ed infine normalizzate sul campione totale.



Figura 35: Microscopio utilizzato per il riconoscimento composizionale del sedimento. Modello Zeiss Stemi DR 1040



Alla luce di questa operazione appare evidente che il valore della componente percentuale fornita per ciascuna famiglia non è più meramente areale ma piuttosto ponderale-areale.

Il metodo, poiché non tiene conto dei differenti pesi di volume peculiari di ciascuna componente, per esempio tra bioclasti e clasti terrigeni, contiene ulteriori errori nelle valutazioni ponderali-areali.

Infatti le diverse tipologie bioclastiche hanno diversa porosità intergranulare e conseguentemente diverso peso di volume, cosicché tale componente di errore non può essere ridotta od eliminata con un unico, indistinto coefficiente.

Al fine di valutare l'ordine dell'errore, su cinque campioni sono state eseguite calcimetrie (misure della CO<sub>2</sub> sviluppata per attacco con HCL) le quali hanno evidenziato che nelle stime ponderali-areali il contenuto di carbonato bioclastico è stato nel complesso sopravvalutato, nella misura del 10%÷15%, rispetto alle stime rigorosamente ponderali (Lecca ed al., 2005).

In ogni caso, al fine del presente studio, tali incertezze non pregiudicano il significato dell'analisi soprattutto rivolta alla valutazione dei rapporti tra la totale componente terrigena e quella carbonatico-bioclastica.

### 2.3.3 RISULTATI RILIEVO 2007

Le analisi granulometriche (le cui schede di analisi sono riportate in allegato) hanno dimostrato una sostanziale omogeneità granulometrica nei campioni esaminati. Il coefficiente di cernita è stato per tutti compreso tra i valori 0.55 – 0.65, sedimento bene/discretamente classato, ad eccezione del campione P10 che probabilmente costituisce un *outlayer* da eliminare.

Ho registrato la presenza di granulometria più fini nei campioni P07, P08 e nel campione P12. Il riconoscimento della loro composizione ha messo in evidenza una diversa distribuzione della componente bioclasica, la quale come ci si allontana dal Poetto di Cagliari varia del 20%, fino ad arrivare al Poetto di Quartu/Margine rosso dove gli scarti scendono a percentuali bassissime, dell'ordine del 3%, per poi rimanere a livelli inferiori od uguali al 10%.

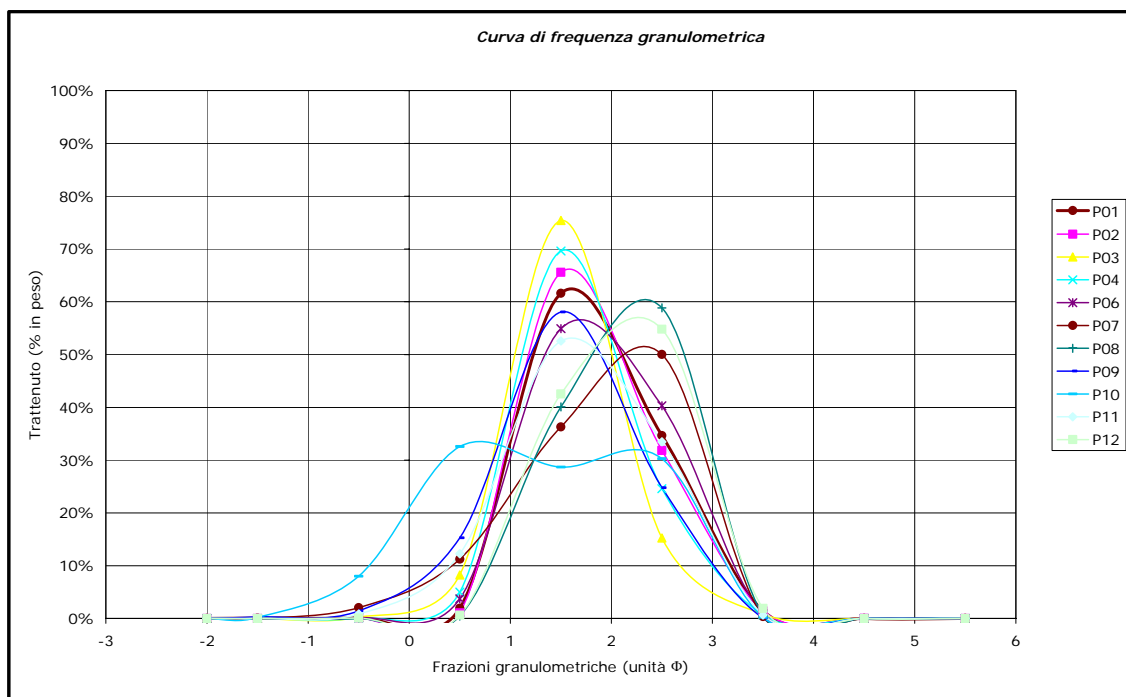


Figura 36: Curva di frequenza granulometrica dei campioni da me esaminati. Si nota una sostanziale omogeneità di valori. Quasi tutti i campioni sono compresi nella cuspide della curva  $1 \div 2\Phi$  ad eccezione del campione 10 (*outlayer*) e dei campioni 7, 8 e 12.

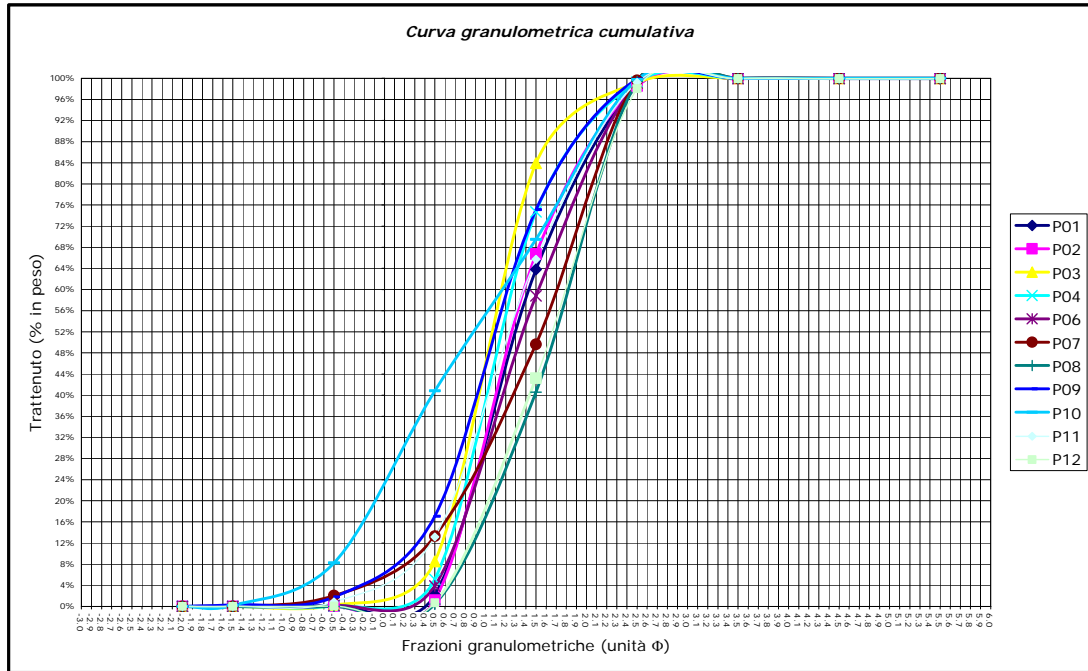
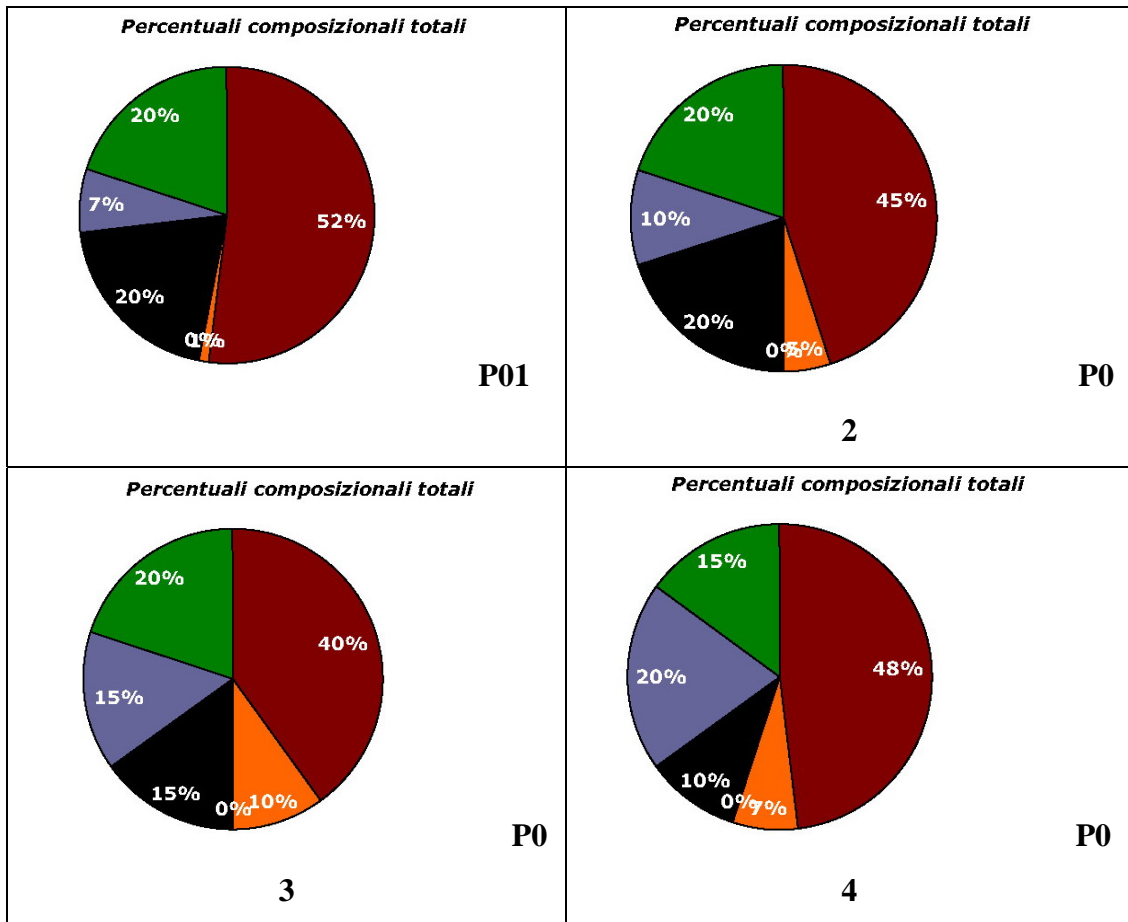


Figura 37: Rappresentazione delle Curve granulometriche cumulate per i campioni di sedimento da me esaminato.



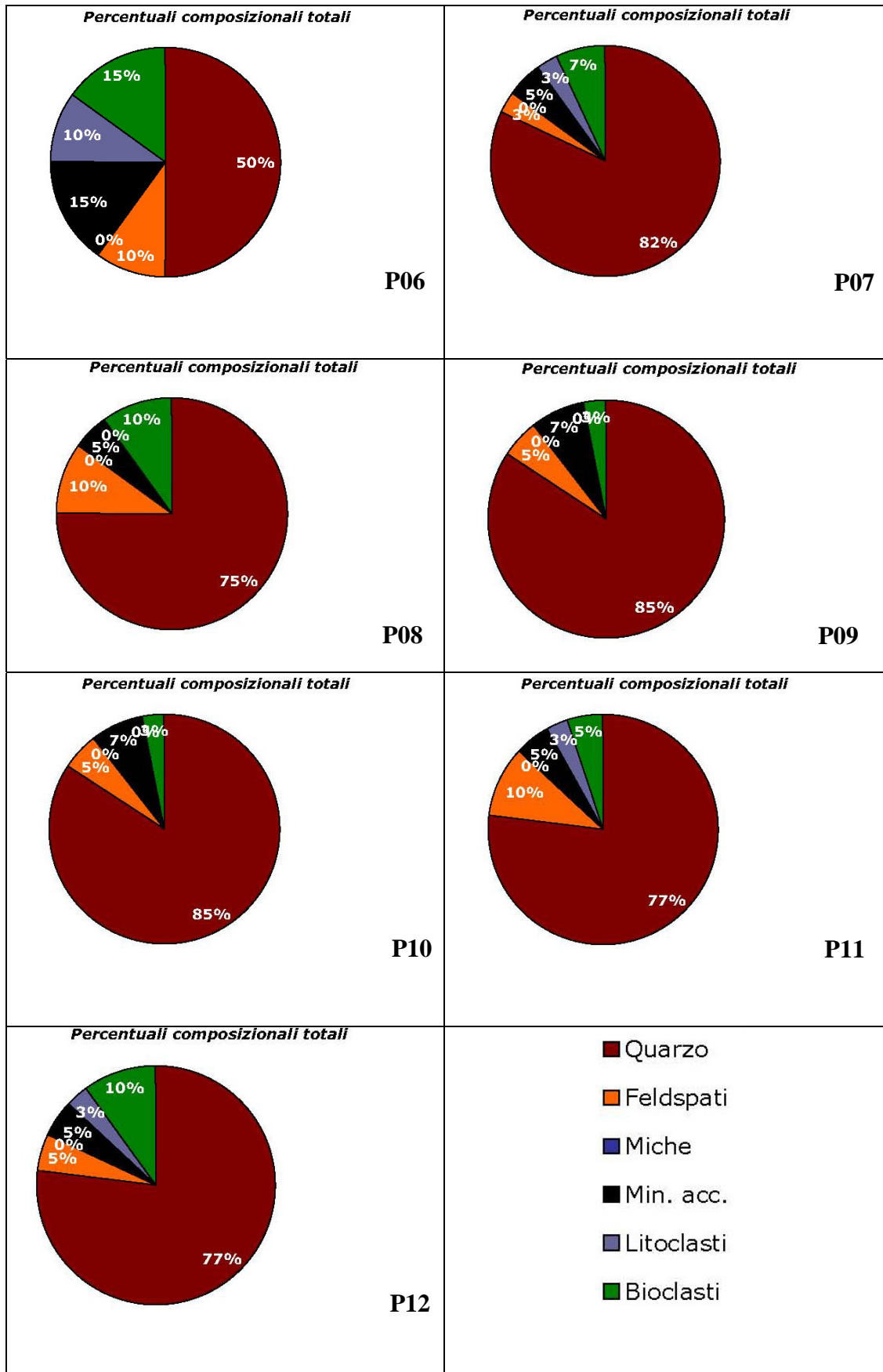


Tabella 6: raffigurazione sintetica delle componenti composizionali dei campioni da me esaminati.

### 2.3.4 RISULTATI RILIEVO 2003

L'analisi preventiva dei campioni di Lecca ed al<sup>24</sup> hanno evidenziato una sostanziale disomogeneità granulometrica e composizionale. I campioni RC27 ed RC28, prelevati nell'area sottoposta a ripascimento (vedi Figura 33), sono caratterizzati da una elevata percentuale di componente bioclastica, (oltre il 70 %), e da coefficienti di cernita tipici di sedimenti mediocrementemente classati ( $\sigma\Phi = .1.20$ )

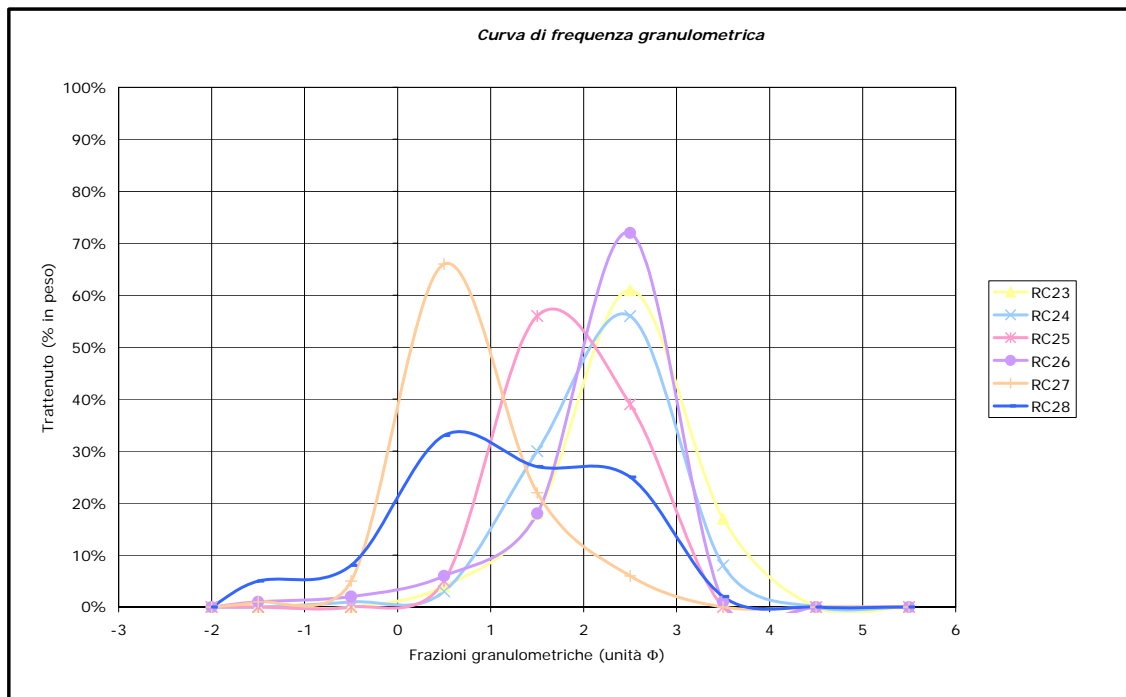


Figura 38: Rappresentazione delle curve di frequenza granulometrica dei campioni raccolti nella campagna 2003 da Lecca ed al. E' chiara la disomogeneità tra i campioni RC28, RC27, che appaiono più grossolani degli altri 4.

La granulometria dei campioni RC28 e RC27 è mediamente più grossolana rispetto a quella riscontrata nei restanti 4 campioni, per i quali il trattenuto prevalente è compreso tra i setacci  $0\div 1 \Phi$ .

I campioni RC23,24,25,26 presentano valori del coefficiente di cernita compresi tra  $0.55\div 0.65$ , risultando quindi sedimento discretamente classato. Il contenuto bioclastico del campione RC26 si attesta al 27%, valore di passaggio tra il 72 %, 78% dei campioni RC28 e RC27 ed i rimanenti RC23,24,25, caratterizzati da una

<sup>24</sup> ibidem

bassissima presenza di componente bioclastica, rispettivamente pari a 8%, 3% e 2% (vedi Tabella 7).

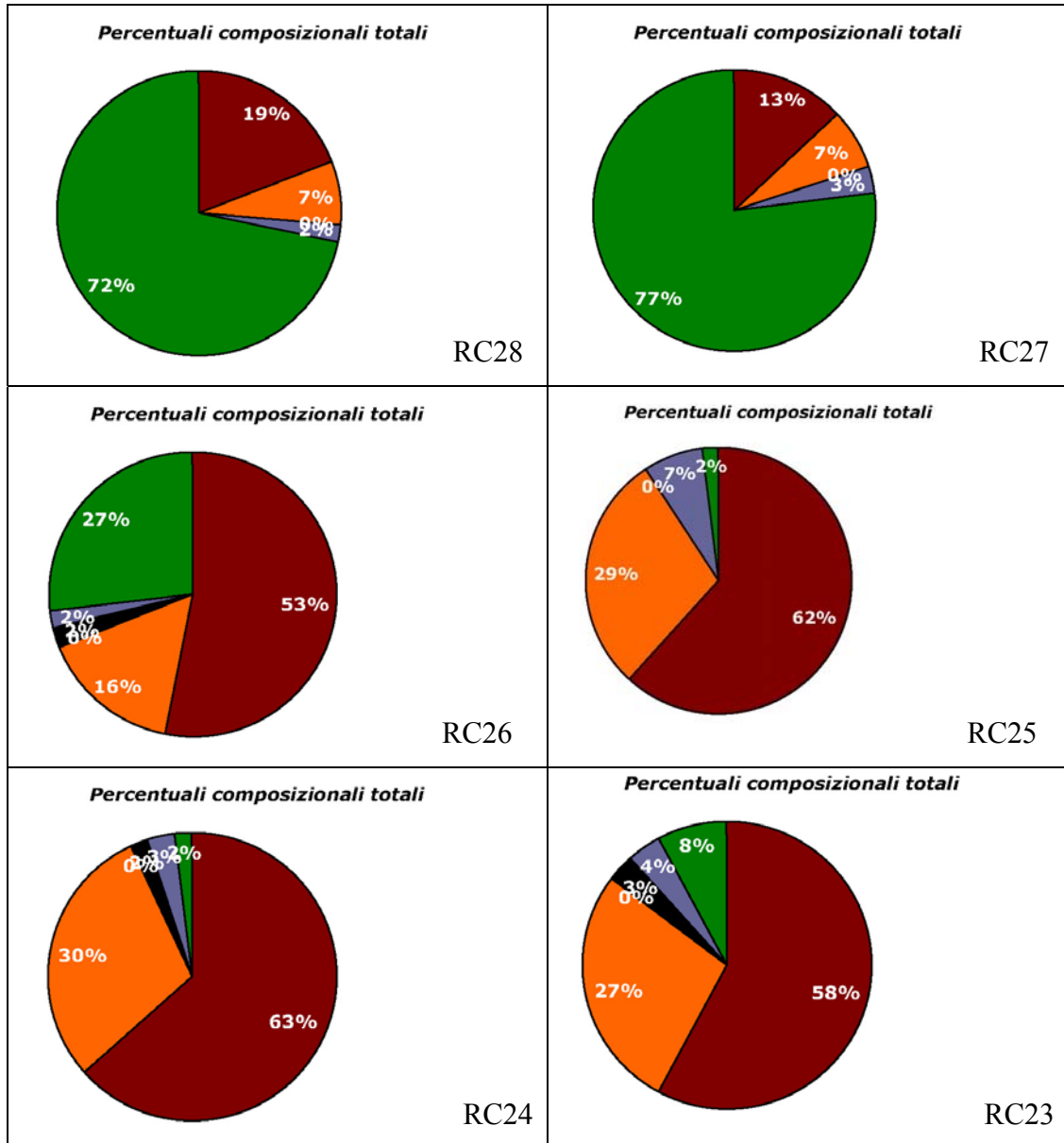


Tabella 7: raffigurazione sintetica delle componenti composizionali dei campioni della campagna 2003. Si nota la forte differenza di componente bioclastica tra i campioni RC28, RC27, ubicati nell'area soggetta a ripascimento, ed i rimanenti 4. Il campione RC26 presenta una componente bioclastica del 27%.

### 2.3.5 ANALISI COMPARATA RILIEVO 2003 – RILIEVO 2007

La comparazione dei dati da me rilevati con quelli del 2003, è avvenuta per confronto dei campioni planimetricamente più prossimi.

In particolare, ho effettuato il confronto tra le coppie RC28-P01, RC27-P04, RC26-P07, RC25-P09, RC24-P11, RC23-P12.

E' importante notare che, data la metodologia di riconoscimento della composizione la comparazione delle singole componenti terrigene è scarsamente significativa. La suddivisione tra componente terrigena e bioclastica è invece affidabile.

Coppia RC28-P01 (Tabella 8): Appare evidente il forte discostamento tra i due dati, per quanto riguarda sia la tessitura sia la composizione. Si registra un notevole abbattimento del contenuto bioclastico ed una contemporanea diminuzione del D50 che passa da 0.8 mm a 0.38 mm.

Coppia RC27-P04 (Tabella 9): vi è un forte discostamento tra i due dati. Rispetto a tessitura e composizione. Si registra un notevole abbattimento del contenuto bioclastico ed una contemporanea diminuzione del D50 che passa da 0.9 mm a 0.42 mm.

Coppia RC26-P07 (Tabella 10): Il campione P07 è caratterizzato dalla presenza di una minore quantità di materiale bioclastico. Nello stesso tempo per le caratteristiche tessiturali si registra un incremento del diametro D50 fino a 0.36 mm.

Coppia RC25-P09 (Tabella 11): Sia i dati granulometrici che composizionali mostrano una sostanziale sovrapposibilità del dato.

Coppia RC24-P11 (Tabella 12): Il confronto tra i due campioni RC24 (2003) ed P11, mostra una sostanziale invarianza del contenuto bioclastico ed un lieve aumento della granulometria intuibile dalla forma delle curve.

Coppia RC23-P12 (Tabella 13): I campioni RC23 (2003) e P12 (2003) mostrano una sostanziale invarianza sia nel contenuto bioclastico sia in quello granulometrico che, tuttavia, ha subito un leggero incremento.

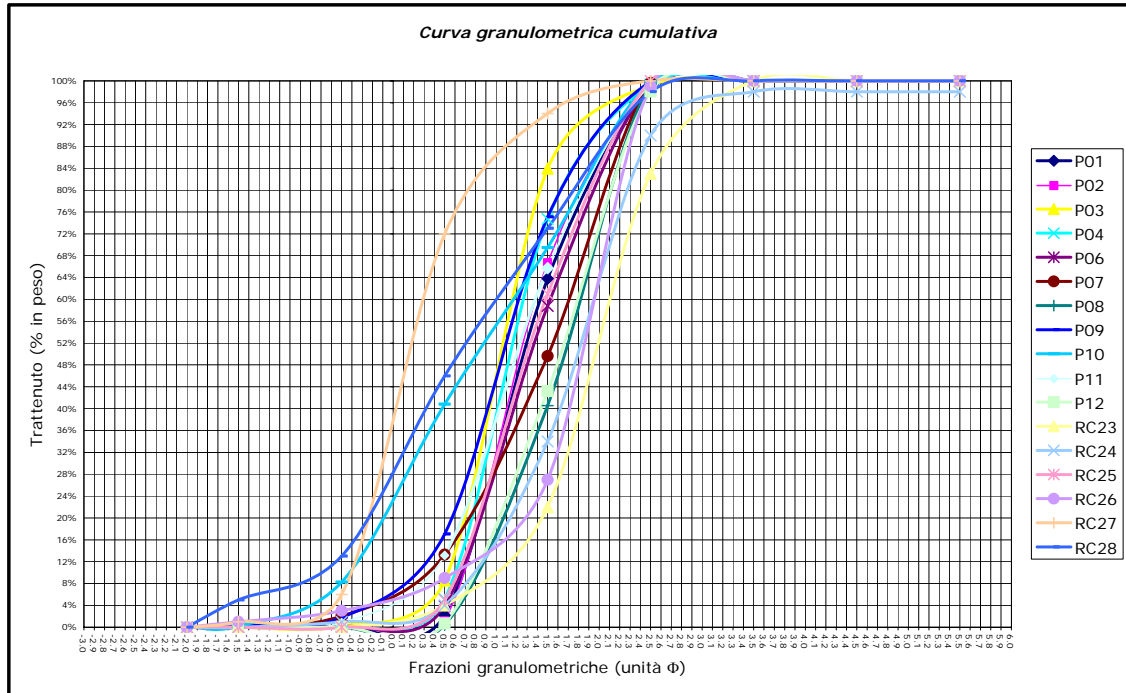


Figura 39: Curva di granulometrica cumulativa dei campioni di tutti i campioni (2003+2007): Campioni RC28 e RC 27 spiccano per i valori più elevati.

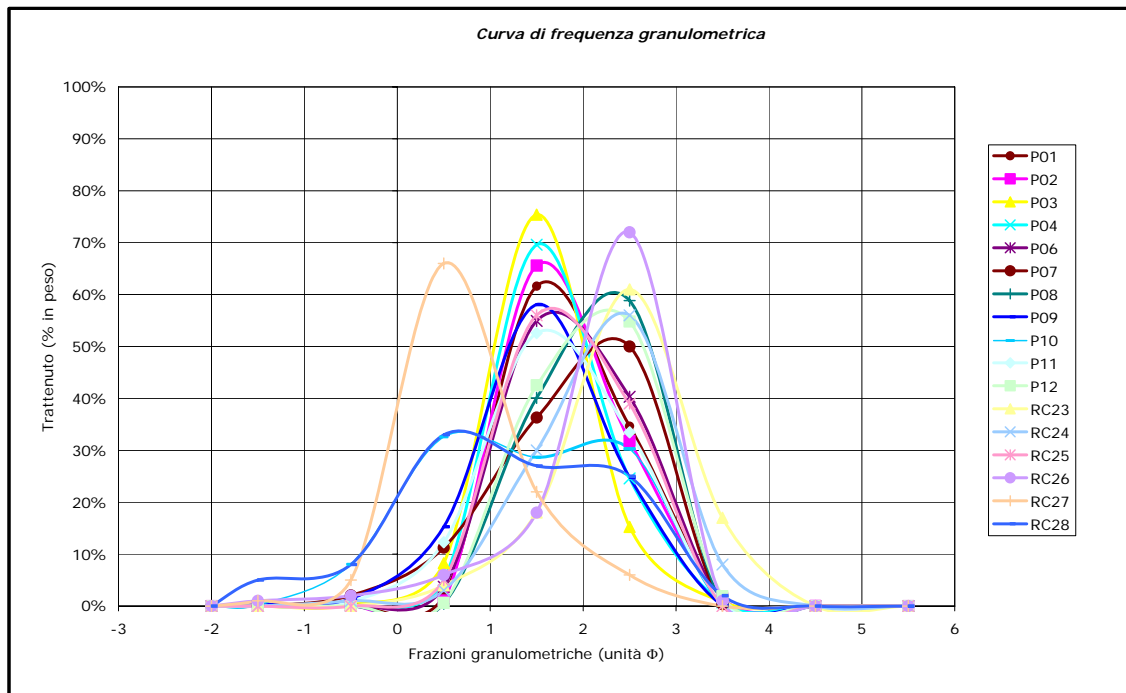


Figura 40: Rappresentazione totale (2003+2007) delle curve di frequenza granulometrica dei campioni da me esaminati: I Campioni RC28 ed RC2, rappresentati dalle curve più a sn del grafico, risultano più grossolane rispetto a tutte le altre



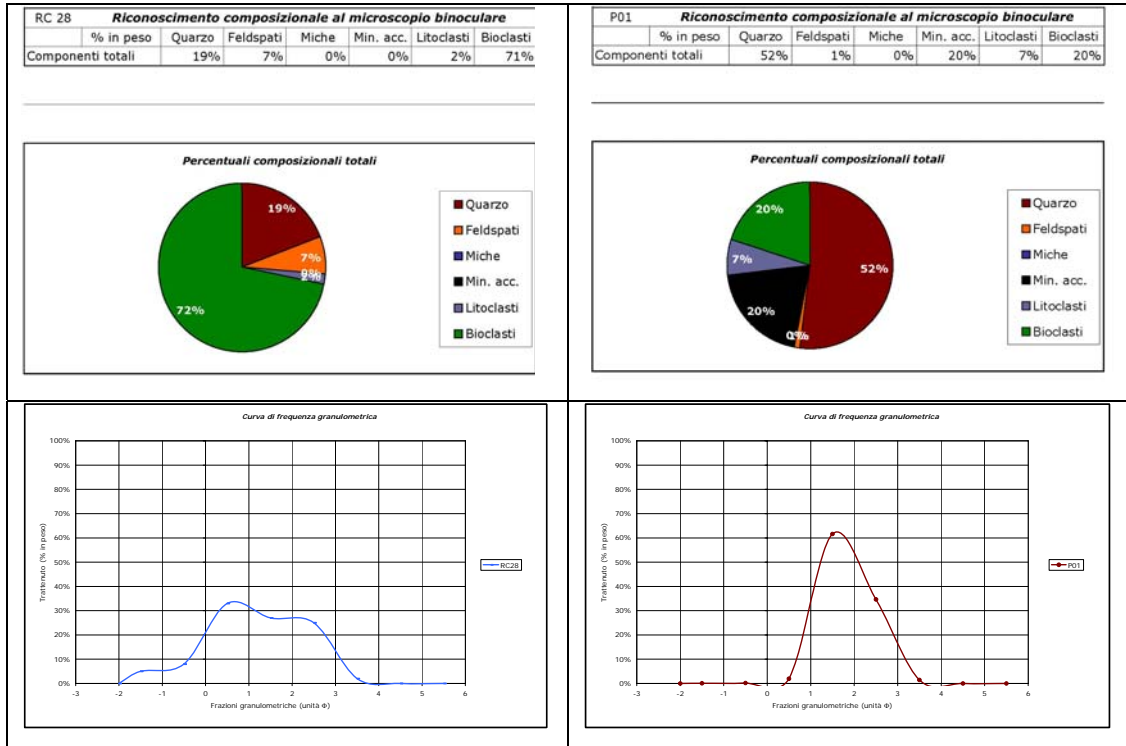


Tabella 8: Diagramma di confronto tra i due campioni RC28 (2003) ed P01 (2007). Appare evidente il forte di scostamento tra i due dati, sia in termini tessiturali che in termini composizionali. Si registra un notevole abbattimento del contenuto bioclastico ed una contemporanea diminuzione del D50 che passa da 0.8 mm a 0.38 mm

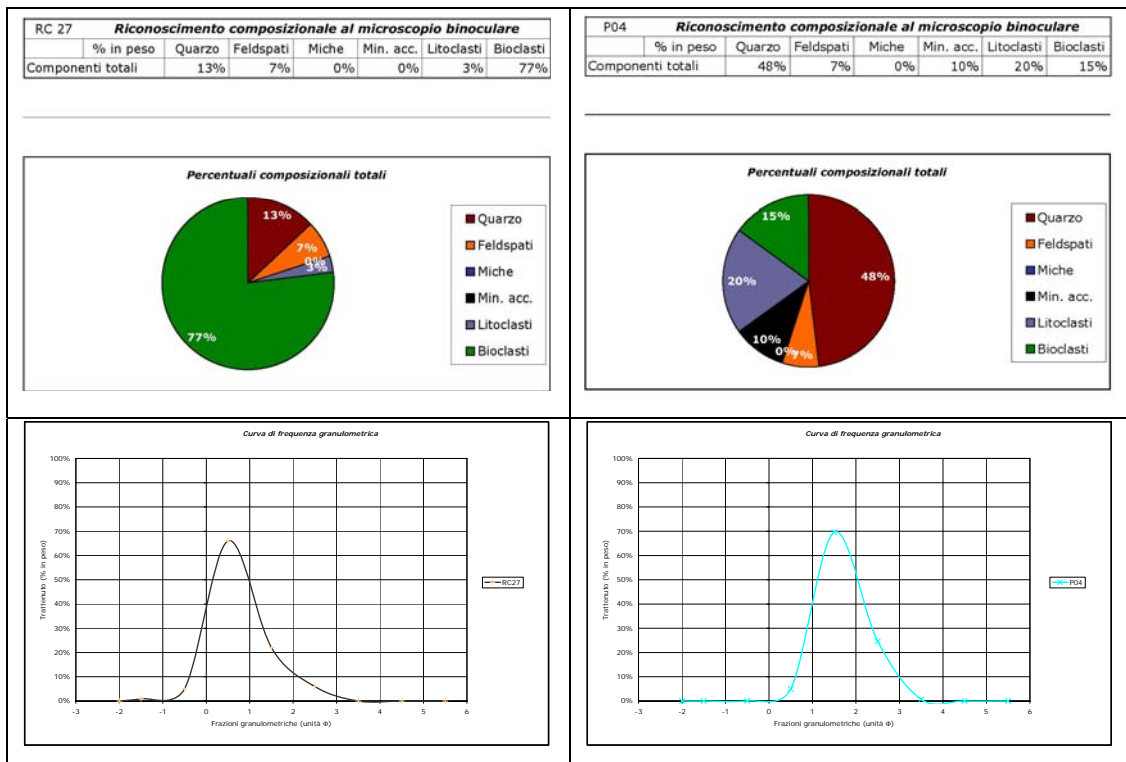


Tabella 9: Diagramma di confronto tra i due campioni RC27 (2003) ed P04 (2007). Appare evidente, anche qui, il forte di scostamento tra i due dati, sia in termini tessiturali che in termini composizionali. Si registra un notevole abbattimento del contenuto bioclastico ed una contemporanea diminuzione del D50 che passa da 0.9 mm a 0.42 mm

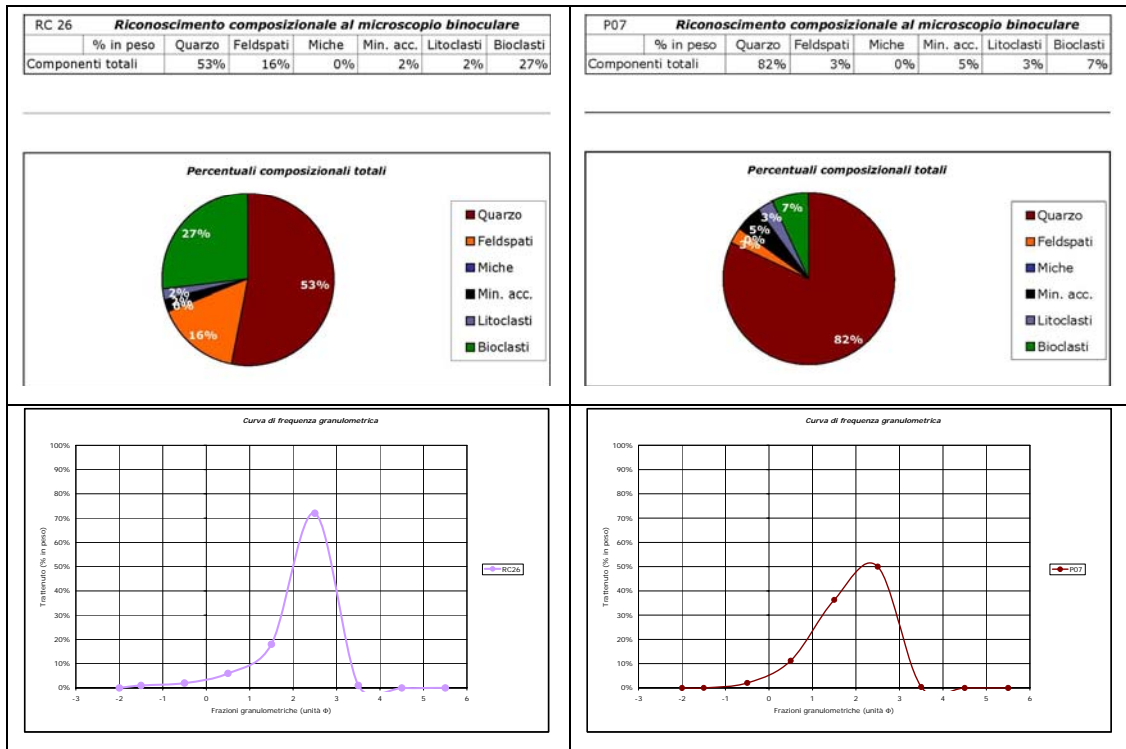


Tabella 10: Grafici di confronto tra i campionamenti RC26 (2003) e P07 (2007): il campione P07 è caratterizzato dalla presenza di una minore quantità di materiale bioclastico. Nello stesso tempo le caratteristiche tessiturali registrando un incremento del diametro D50 fino a 0.36 mm.

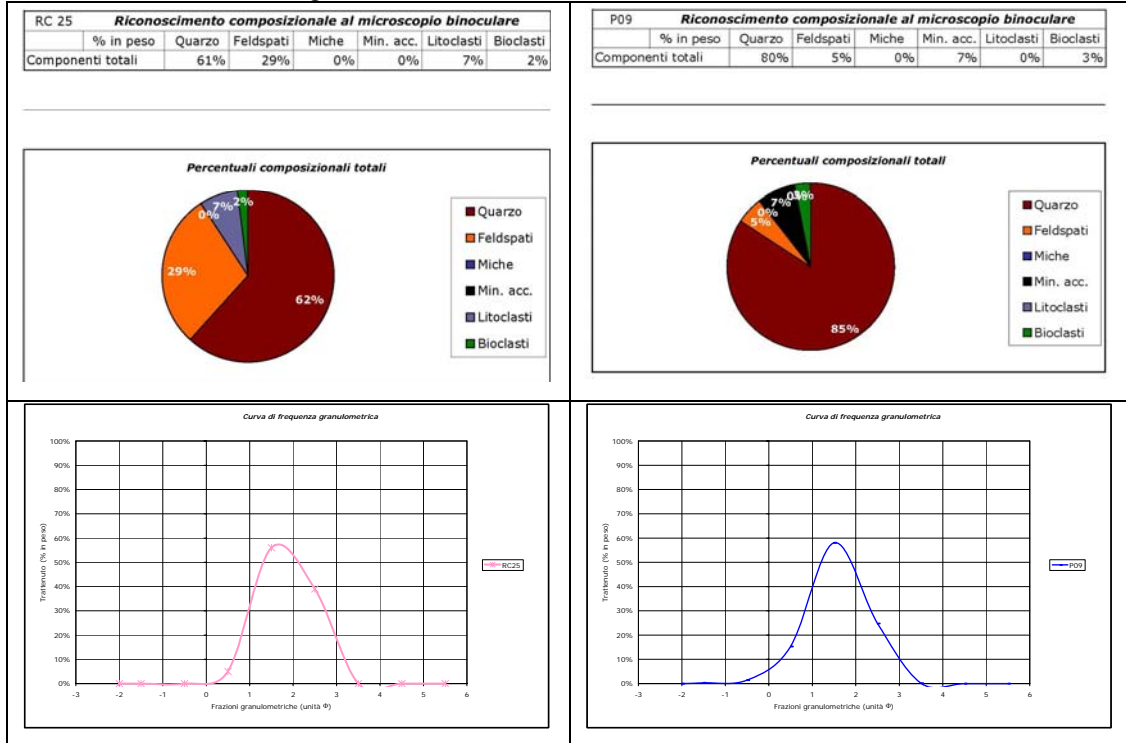


Tabella 11: grafici a confronto tra il campione RC25 ed P09. Sia i dati granulometrici che composizionali mostrano una sostanziale sovrapponibilità del dato.

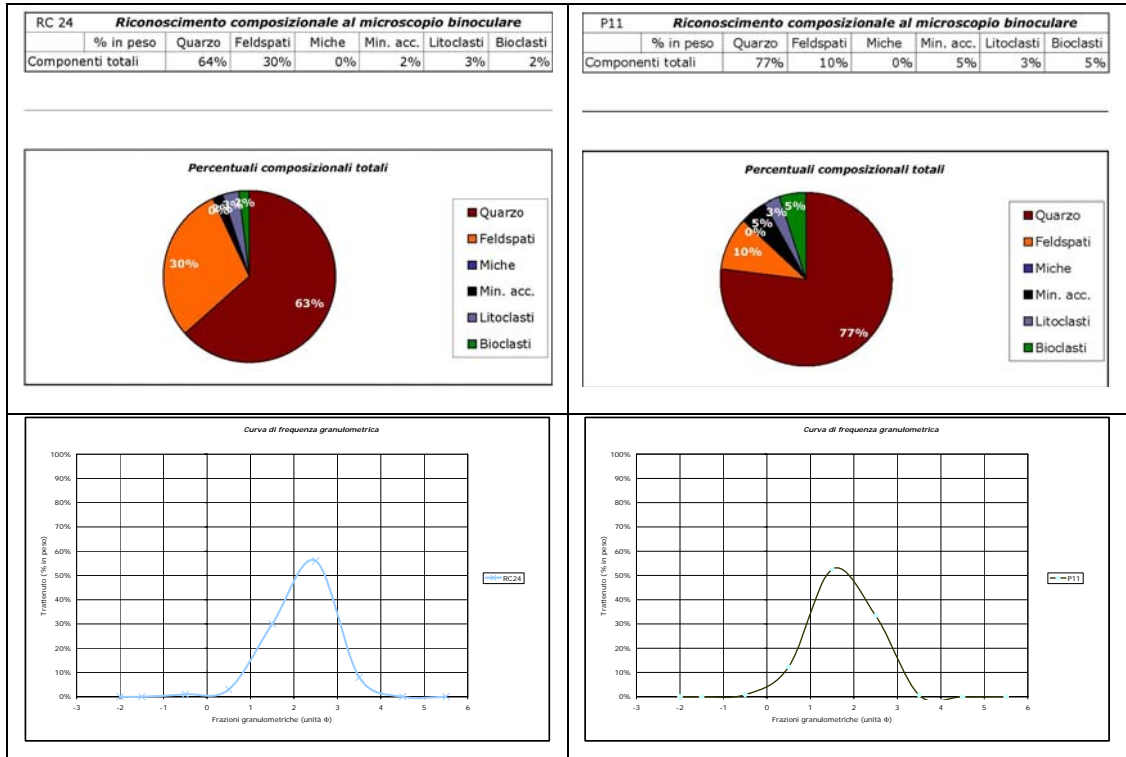


Tabella 12: Il confronto tra i due campioni RC24 (2003) ed P 11, mostra una sostanziale invarianza del contenuto bioclastico ed un lieve aumento della granulometria che passa da un D50= 0.27 mm ad uno 0.4 mm

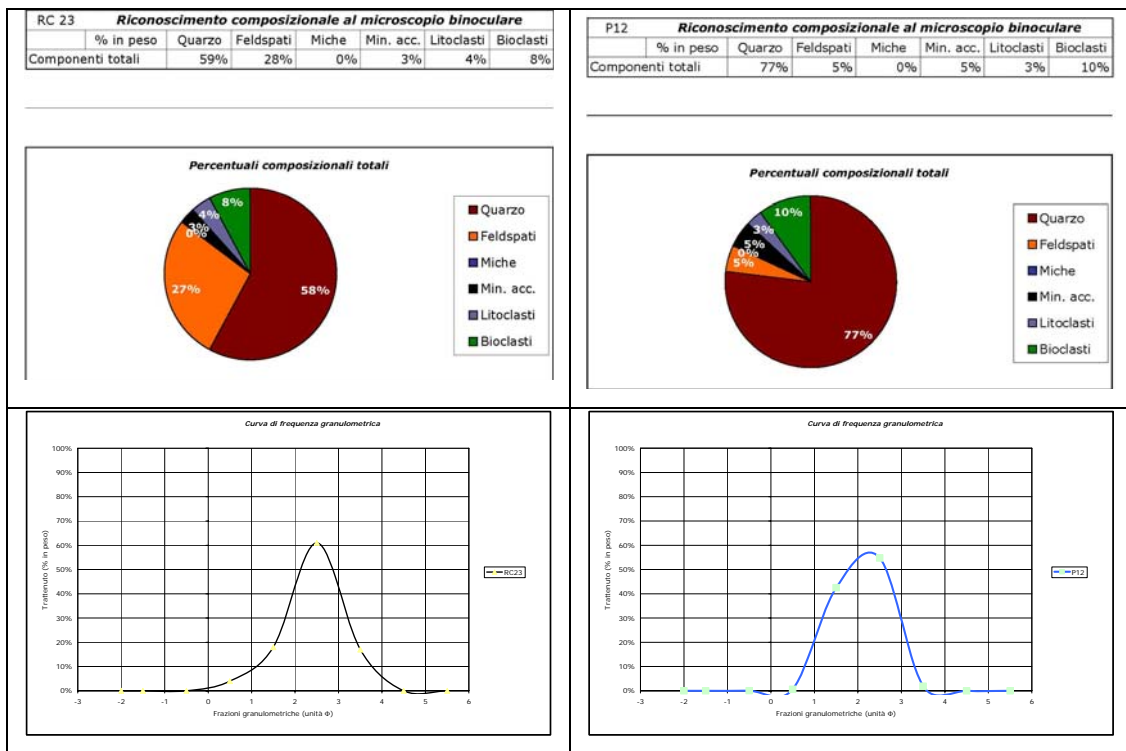


Tabella 13: I campioni RC23 (2003) e P12 (2003), mostrano una sostanziale invarianza sia nel contenuto bioclastico. Il D50 ha subito un leggero incremento.

## **2.4 MAPPATURA DEI SEDIMENTI E CALCOLI VOLUMETRICI DISPONIBILI**

Nel Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento compiuto dalla società Modimar di Roma viene riportata una serie di dati che ho ritenuto importante Considerare ed integrare con quelli dei miei rilievi per un corretta analisi delle dinamiche in atto nel litorale.

In particolare si presentano i risultati di tre differenti campagne consistite nel prelievo ed analisi di 47 campioni di sedimenti nella spiaggia sommersa compiute dalla Provincia di Cagliari nel dicembre 2001-gennaio 2002, febbraio –aprile 2003 e ottobre- dicembre 2003 (Figura 41, Figura 42, Figura 43).

Nello stesso rapporto si è fatto un computo dei volumi di sedimento residui nella zona di ripascimento del Poetto a distanza di 6, 15, 21 mesi dall'avvenuto sversamento di 360.000 mc di sedimento nei primi 1900 metri del litorale.

Secondo tale rapporto., a 21 mesi dai lavori. il totale del sedimento mancante dal profilo attivo di spiaggia rispetto al volume sversato, sarebbe ammontato a 116.194 m<sup>3</sup>, dei quali 98.970 m<sup>3</sup> sarebbero repentinamente scomparsi nei 6 mesi seguenti i lavori, mentre la restante parte, di 17.224 m<sup>3</sup> sarebbe stata erosa nei 15 mesi successivi.

Nel rapporto si specifica che la perdita maggiore si riscontrò in corrispondenza del tratto compreso tra i 600 ed i 1300 metri dell'arenile. La ricerca ha consentito inoltre di ottenere ulteriori analisi granulometriche e petrografiche (Valloni, 2002)<sup>25</sup> che confermano i dati rilevati durante le campagne e che per completezza vengono riportate negli allegati (pag. 104 e segg.) al presente studio.

---

<sup>25</sup> Valloni R., 2002. Analisi petrografia sabbia – composizione modale d'insieme nell'ambito de "Lavori di salvaguardia del litorale del Poetto e strada di collegamento". Univ. Parma – Dipartimento di scienza della Terra, Laboratorio di petrografia dei sedimenti e sedimentologia

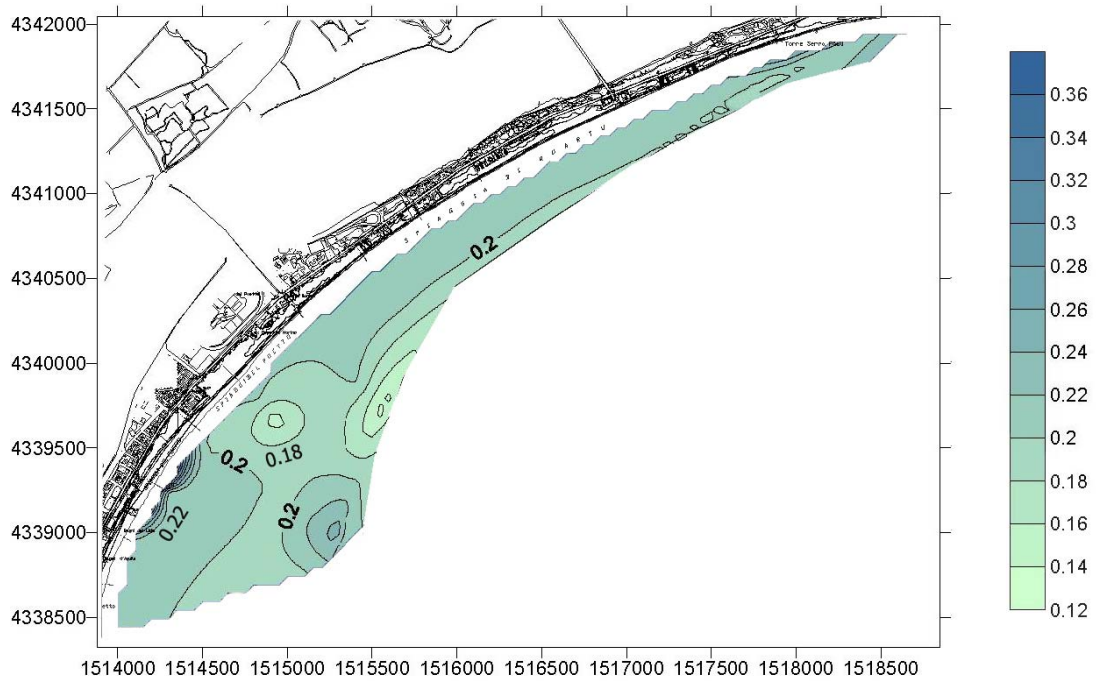


Figura 41 Mappa della distribuzione del D 50 [mm] calcolato dalle misure dei campionamenti effettuati nel dicembre 2001-gennaio 2002. (fonte rivisitazione figura 6: Rapporto n. 3. Modimar, 2004)

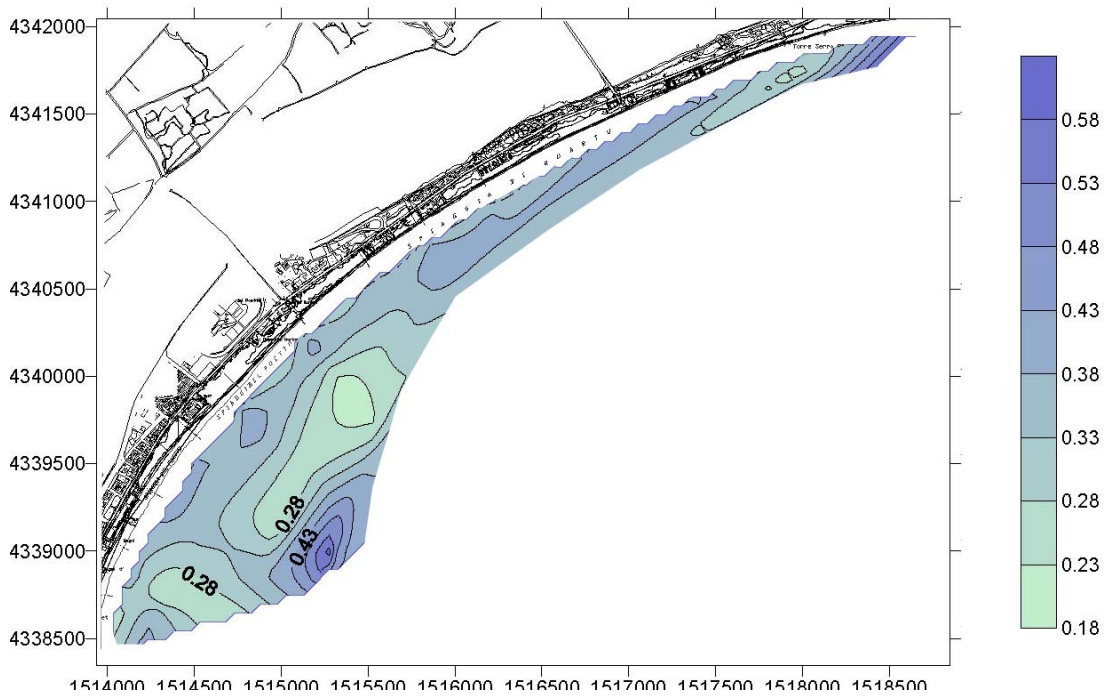


Figura 42: Mappa della distribuzione del D 50 [mm] calcolato dalle misure dei campionamenti effettuati nel febbraio –aprile 2003. (fonte rivisitazione figura 9: Rapporto n. 3. Modimar, 2004)



Figura 43: Mappa della distribuzione del D 50 [mm] calcolato dalle misure dei campionamenti effettuati nel ottobre dicembre 2003. (fonte rivisitazione figura 9: Rapporto n. 3. Modimar, 2004)

## **2.5 ANALISI DEI RISULTATI DEI DATI RILEVATI E DETERMINAZIONE DELLE LINEE EVOLUTIVE IN ATTO**

I risultati delle campagne effettuate, unitamente ai dati presenti in bibliografia, permettono di stabilire quali siano i processi evolutivi in atto lungo il litorale del Poetto.

Nell'ambito del progetto di salvaguardia del litorale, nel marzo del 2002 è stato effettuato lo sversamento di ~ 360.000 mc di sedimento. Esso ha comportato l'avanzamento della linea di riva di parecchie decine di metri per un tratto di costa di circa 2 km.

Il piano di monitoraggio attivato in occasione dell'intervento, ha attivato una serie di rilevazioni utili allo scopo: misure ondametriche, anemometriche, sedimentologiche e plano altimetriche, che tuttavia hanno avuto termine nel corso del 2004 a due anni dall'intervento.

A partire dal 2005 ho cominciato una serie di campagne di rilevamento finalizzate all'integrazione dei dati a disposizione, concentrandomi in particolar modo sulla rilevazione della linea di riva. Ho inoltre effettuato una campagna di campionamento e prelievo di sedimenti lungo la battigia, che hanno consentito una miglior definizione dello stato di fatto oltre che un'analisi comparata con una precedente campagna di ricerca effettuata nel 2003 (Lecca ed al., 2003).

L'analisi da me compiuta a seguito delle succitate campagne, opportunamente integrate con i dati disponibili, consentono di valutare come si stia evolvendo il litorale. E' importante tenere presente che Il Poetto non ha significativi apporti di sedimento da corsi d'acqua, né d'altra parte vi sono più estrazioni di sabbia.

Il Poetto è interessato da un doppio fenomeno di avanzamento/arretramento per i processi erosivi che lo modificano con differenti intensità, per tutta la sua lunghezza.

In particolare, è in arretramento il tratto di spiaggia che si stende in territorio di Cagliari per circa 1.8 km. Da Marina Piccola all'Ospedale Marino, mentre il tratto restante di circa 7.7 km, da questo punto al Margine Rosso, in territorio di Quartu S.E., è in avanzamento.



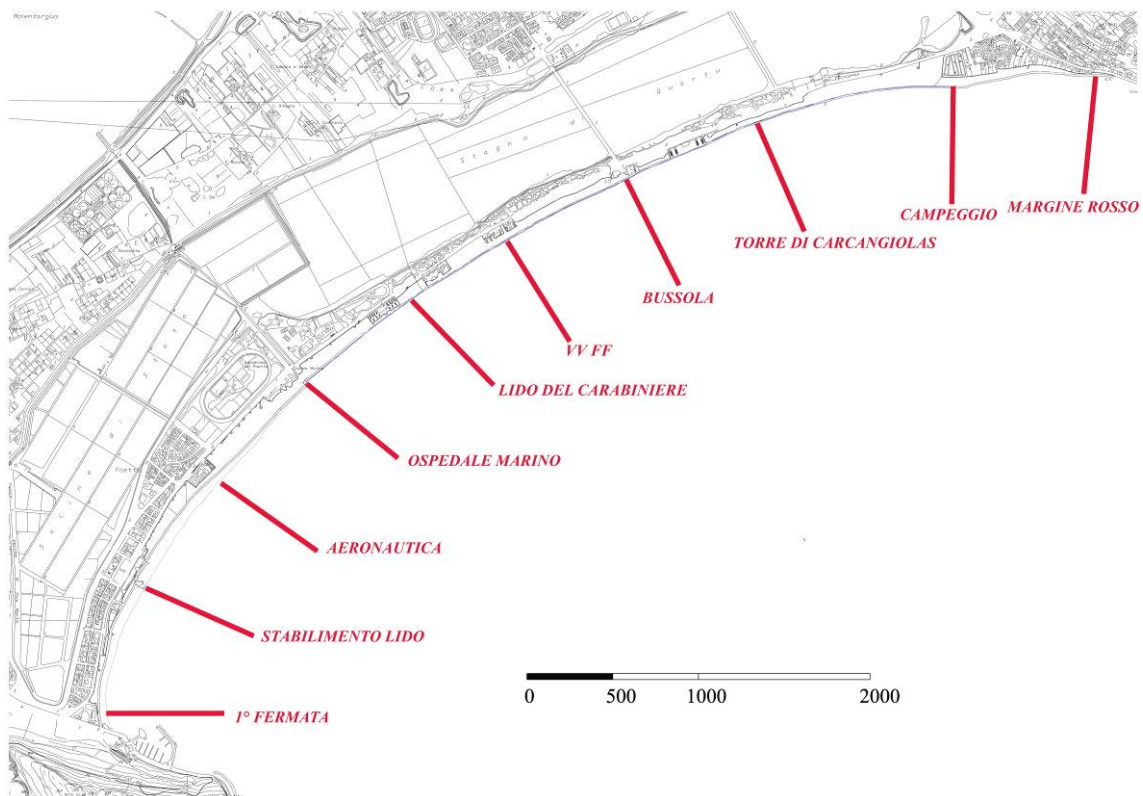


Figura 44: Ubicazione delle principali località citate.

Negli ultimi tre anni, nella parte occidentale (vedi Figura 27), i ratei annui di erosione sono in rapida diminuzione rispetto a quelli riscontrati negli anni 2002÷2004 (vedi Figura 28). In corrispondenza del tratto antistante gli stabilimenti balneari del D'aquila e Lido, essi passano da valori massimi di arretramento riscontrati di 23 m/m/anno fino agli attuali 2÷3 m/m/anno. Contemporaneamente i tassi di avanzamento della linea di costa nel tratto che va dall'ospedale Marino al Margine Rosso, già da subito di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelli riscontrati per l'arretramento, sono passati dai 2÷3 m/m/anno ad un rateo annuo spesso inferiore ad 1 m/m/anno.

Tale circostanza trova conferma anche nelle analisi comparate dei sedimenti prelevati lungo la battigia, le quali dimostrano la presenza di una crescente quantità di materiale grossolano proveniente da occidente fino al tratto di spiaggia individuato dalla presenza della Torre di Carcangiolas.

Gli studi della Provincia hanno portato a stimare che il quantitativo di sabbia erosa dalla spiaggia di Cagliari nei due anni successivi al ripascimento del 2002 sarebbe



stato dell'ordine dei 110.000 m<sup>3</sup>. Coi miei rilievi ho stimato che, nello stesso periodo, circa il 20 % di tale quantitativo (22.000 m<sup>3</sup>) sarebbe stato depositato lungo la spiaggia di Quartu S.E per effetto della deriva litoranea. La restante parte della sabbia sarebbe pertanto andata dispersa sul fondale del Golfo per effetto del trasporto trasversale particolarmente intenso nel tratto 1°fermata-Ospedale Marino.

Tutto ciò è indicativo di una corrente litoranea diretta da ovest verso est. Le notevoli differenze riscontrate nei ratei annui d'avanzamento/arretramento per i diversi tratti esaminati indicano, nel tratto occidentale del Poetto, asporto per erosione del sedimento dovuta all'azione del moto ondoso con un importante quota parte che migra per trasporto trasversale ed in parte, longitudinalmente, verso il tratto orientale della spiaggia. Ciò trova conferma sia dall'analisi dell'evoluzione della linea di riva, sia dai rilievi di sedimento effettuati (vedi par 2.3).

La diversa Granulometria e composizione del materiale sversato in occasione del ripascimento del Poetto ha consentito di considerare tale materiale quale indice di attività e marker dei processi in atto.

E' altresì evidente che il trend arretramento/avanzamento della linea di riva, stia subendo negli ultimi anni una decelerazione. Il sistema, dopo l'immissione di tanto materiale in seguito al succitato sversamento, si sta riequilibrando: le analisi comparate delle granulometrie dei campioni e soprattutto delle percentuali di bioclasti in essi presenti, mostrano chiaramente un rallentamento dei processi erosivi e di trasporto. In termini relativi, appare chiaro come il trasporto prevalente lungo la spiaggia del Poetto non sia avvenuto in senso longitudinale: anche nell'anno successivo al ripascimento, quando molto del materiale sversato è rientrato in circolo, e molto del materiale più leggero era stato mobilitato, non si riscontrarono segni evidenti di trasporto verso il Margine Rosso.

### 3 MODELLAZIONE NUMERICA

Questo capitolo analizza lo studio di modellazione numerica effettuato al fine di rappresentare il regime evolutivo della spiaggia del Poetto di Cagliari. Ho condotto lo studio utilizzando principalmente tre modelli numerici:

1. Il modello SWAN, sviluppato dal Politecnico di Delft, rivolto allo studio di trasformazione del moto ondoso
2. UNIBEST, sviluppato dalla WL | Delft Hydraulics; modello ad una linea, finalizzato, una volta calibrato, alla determinazione dell'evoluzione a lungo termine della linea di riva
3. DELFT3D, modello bi/tridimensionale sviluppato dalla WL | Delft Hydraulics che consente la determinazione del clima meteo-marino del paraggio in esame e dei fenomeni morfologici costiero innescati dalle correnti o clima ondoso.

Il modello di trasformazione numerica SWAN è alla base del corretto funzionamento degli altri due modelli: in zone dove le dinamiche costiere siano dominate dal trasporto litoraneo innescato dal clima ondoso (*wave climate dominated*), appare chiara l'esigenza di stabilire come esso si presenti nel sito di interesse.

I risultati del modello SWAN sono stati usati come *input* dagli altri due modelli, i quali possono estrarne i risultati ed implementarli con particolari tecniche.

Ho svolto le simulazioni Delft3D con modalità di calcolo bidimensionale a profondità mediata (2DH) e tridimensionale completa. Tuttavia, alcuni test-case hanno mostrato come, nel caso del Poetto, le simulazioni tridimensionali non risultino più significative di quelle bidimensionali. L'assenza di ostacoli, di stratificazione salina, di immissioni fluviale, contribuisce in maniera determinante alla definizione del "problema" modellato senza particolari difficoltà. L'applicazione della modalità 3D in tutte le simulazioni compiute avrebbe aumentato di molto i tempi di calcolo. Nei test case esaminati il rapporto è sempre stato superiore a 10.

Il capitolo si sviluppa con la definizione e descrizione dell'area oggetto di studio. Sono prima rappresentati gli elementi descrittivi comuni e quindi mi soffermerò su ciascuno di essi illustrando impostazioni, basi teoriche e risultati di ognuno.

### 3.1 STUDIO DELL'AREA D'INTERVENTO

L'area d'interesse è situata nel Golfo degli Angeli, nella sua parte compresa tra il promontorio della Sella del Diavolo ed il Margine Rosso. La spiaggia del Poetto si sviluppa per oltre 7,7 chilometri di lunghezza.

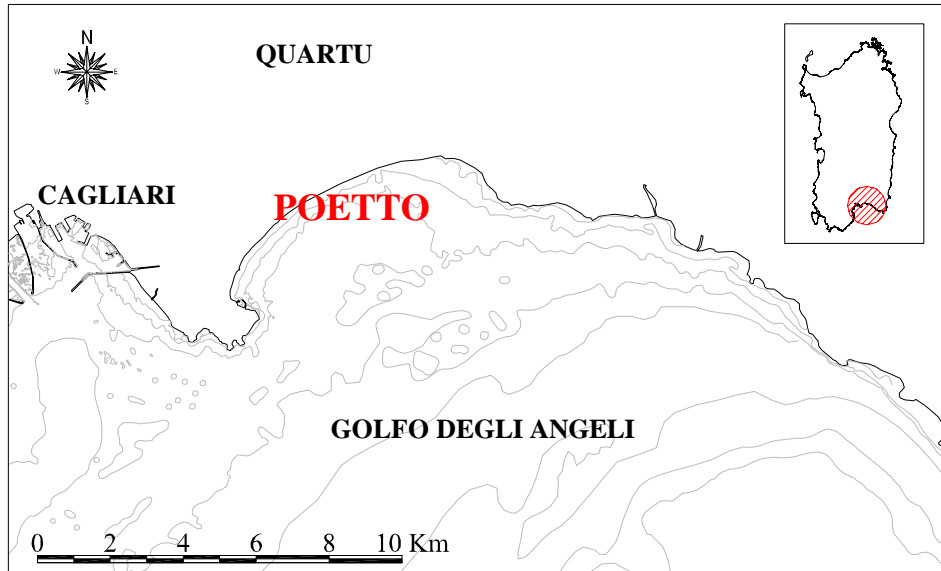


Figura 45: ubicazione dell'area oggetto dello studio

L'area di studio ricopre una superficie totale di circa 164 km<sup>2</sup>. In particolare l'area interessata dallo studio idro-morfodinamico ricopre una superficie di circa 380 ettari, ovvero la medesima superficie coperta dai rilievi *multibeam*. La batimetria varia da un massimo di circa 200 m di profondità all'estremo sud orientale della griglia di calcolo più grande, fino alla linea di riva.

Come noto, i processi idro-morfodinamici possono essere generati da correnti di marea, dalle correnti generate dalle onde o da altre correnti che interessano il Golfo (come correnti di densità) che risultino avere significativi valori di intensità; nel caso in esame si può ragionevolmente escludere una seria influenza sui processi di evoluzione morfo-dinamica dei profili di spiaggia sia delle correnti indotte da escursioni di marea, che da eventuali correnti di densità o comunque provenienti da largo non generate da fenomeni ondosi. La letteratura riguardante la zona di studio non riporta, infatti, alcuna significativa presenza di questo tipo di correnti. Il basso valore di escursione di marea del porto di Cagliari (appena 30 cm), calcolato con le tavole di marea dell'I.I.M.M., dà perfettamente idea della veridicità di questa affermazione.

I dati utilizzati per le varie simulazioni di trasformazione d'onda e di morfo-dinamica sono stati raccolti sia per via diretta che per via indiretta. Alcuni di essi, infatti, sono frutto di fasi dirette di rilievo, altri sono stati ritrovati nella letteratura scientifica ed in progetti riguardanti, anche indirettamente, il Poetto.

### 3.1.1 MAREE

Come detto in precedenza, data la limitata escursione di marea, le correnti da essa indotte, non risultano significative. Tuttavia, per completezza, ho voluto calcolare meglio tale escursione ed introdurla come una delle condizioni al contorno nei modelli idrodinamico e di evoluzione di linea di riva. La variazione dei livelli idrici per il fenomeno di marea è compresa tra i 10 ed i 30 cm. La Figura 46 mostra le variazioni di livelli d'acqua ottenuti da stime di marea ottenute dall'Istituto Idrografico della Marina.

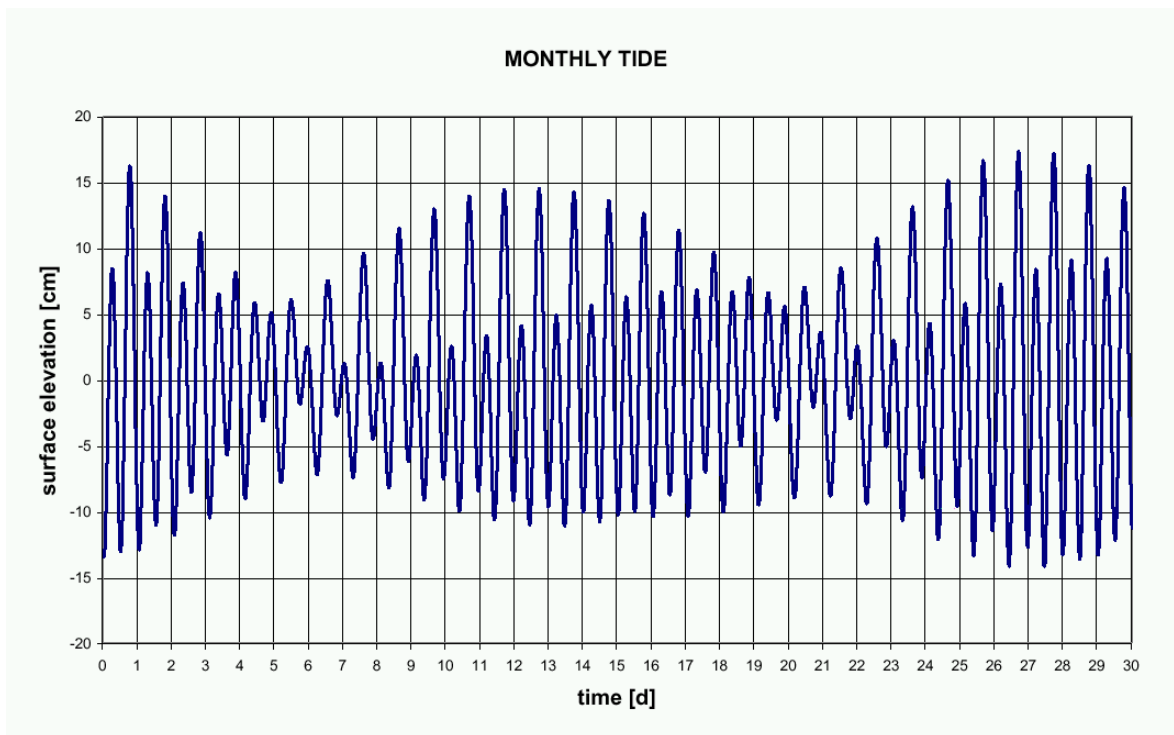


Figura 46: livelli di marea ottenuti da analisi armonica con metodo di Lord Kelvin

### 3.1.2 VENTO

Una delle possibilità offerte dal modello SWAN è quella di tenere conto del ricarico energetico che gli eventi ventosi forniscono alle onde prese in considerazione; appare

quindi importante fornire tali valori al fine di ottenere una più completa e precisa descrizione dei fenomeni che si innescano all'interno dell'area di interesse.

I valori di vento sono stati estrapolati da quelli riportati nel paragrafo 1.4.

### 3.1.3 FORZANTI DI MOTO ONDOSO

I dati di moto ondoso, dedotti da studi precedentemente effettuati sul Golfo di Cagliari o effettivamente rilevati dalla boa ondometrica posta a largo del Poetto, sono riportati sinteticamente in Tabella 2. Per entrambi i modelli ho compiuto la serie completa delle simulazioni del regime ondoso (per un totale di 72 simulazioni) degli stati del mare con  $H_s$  superiore a 0.5 m, assumendo tale soglia come la minima capace di innescare i fenomeni di trasporto litoraneo. Ognuno dei risultati ottenuti è stato imputato ai modelli secondo un peso proporzionale alla sua percentuale di occorrenza.

L'assunzione implicita compiuta con questo approccio è stata quella di ritenere gli anni di rilevazione significativi dell'anno medio. Il modello di evoluzione ad una linea è stato proiettato su un arco temporale di 12 anni.

### 3.2 SWAN

Il Modello SWAN, denominato con l'acronimo di Simulation WAVES Nearshore, è un modello spettrale di terza generazione<sup>26</sup> sviluppato dalla Università Tecnologica di Delft (Olanda). Esso ha il grande vantaggio, rispetto ai suoi predecessori, che i fenomeni fisici sono rappresentati esplicitamente grazie a formulazioni di stato dell'arte e che il modello risulta molto più stabile (schemi completamente impliciti). Un altro suo grande vantaggio è che le simulazioni possono avvenire anche su griglie curvilinee (che si accoppiano meglio con i moduli idrodinamici di Delft3D), e può, per esempio, generare risultati sotto forma di spettri mono e bidimensionali. Per maggior completezza, le forze delle onde sono calcolate dal modello sulla base del gradiente del tensore di "radiation stress" (invece che del tasso di dissipazione come nei precedenti modelli); questo può essere utilizzato come forzante per il calcolo delle correnti indotte dalle onde ed il *set-up* nel modello idrodinamico.

Il modello SWAN è basato su una discretizzazione dell'equazione di equilibrio dinamico che per le coordinate cartesiane assume la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Dove  $N(\sigma, \theta)$  è lo spettro di densità dinamica piuttosto che lo spettro di densità di energia  $E(\sigma, \theta)$  dal momento che la presenza di correnti, la densità di moto è conservata mentre la densità d'energia non lo è.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa  $\sigma$  (come osservata in un istante da un osservatore in moto con la velocità di moto di propagazione) e la direzione d'onda  $\theta$  (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni singola componente spettrale). La densità di moto (*action density*) è uguale alla densità d'energia divisa per la relativa frequenza:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2)$$

Il primo termine dell'equazione rappresenta il tasso di variazione locale nel tempo, il secondo ed il terzo rappresentano la propagazione del moto nello spazio geografico

---

<sup>26</sup> Vedi Holthuijsen ed al. 1993; Ris, 1997.

(con i termini di velocità di propagazione  $c_x$  e  $c_y$ ). Il quarto termine rappresenta l'avanzamento della frequenza relativa dovuta alle variazioni di fondale e di correnti (con la velocità di propagazione  $c^\sigma$  nello spazio  $\sigma$ ). Il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta da variazioni di fondale e di corrente indotta (con velocità di propagazione  $c^\theta$  nello spazio  $\theta$ ). Le espressioni per queste velocità di propagazione sono state prese dalla teoria lineare delle onde<sup>27</sup>. I termini  $S$  ( $= S(\sigma, \theta)$ ) alla destra dell'equazione di bilancio del moto è il termine sorgente in termini di densità di energia rappresentante gli effetti di generazione, dissipazione e interazione onda-onda.

L'equazione è completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Questa ultima caratteristica implica che possono essere calcolati i campi d'onda delle onde di vento propagatisi simultaneamente da differenti direzioni.

Il modello SWAN consente di calcolare l'evoluzione e la trasformazione delle onde di vento (*short crested random waves*) in regioni costiere ed in acque profonde, di transizione e basse ed in aree soggette a correnti.

Il modello SWAN tiene in considerazione l'effetto di rifrazione e rappresenta i fenomeni rigenerativi del vento, la dissipazione di potenza d'onda dovuta al cappucciamento, all'attrito sul fondo ed al frangimento delle onde, nonché dell'interazione onda-onda.

Per evitare eccessivi tempi computazionali ed ottenere un modello robusto per applicazioni pratiche sono state utilizzati schemi completamente impliciti.

Il modello SWAN è stato validato con successo e verificato in parecchi casi di laboratorio ed in complessi campi.

Il modello SWAN tiene conto solo parzialmente dell'effetto diffrattivo.

Le aree di applicazione del modello, comprese tra i 4 ed i 2500 Km<sup>2</sup>, sono molto varie e vanno dal supporto alla progettazione di marine, porti ed installazioni offshore.

Il modulo di trasformazione di moto ondoso può anche essere applicato in coppia con i moduli idrodinamici, come si è fatto nel presente studio.

---

<sup>27</sup> Whitman, 1974; Mei, 1983; Dingemans, 1997.

### **3.3 UNIBEST**

UNIBEST, acronimo di **UNI**form **Beach** **Sediment** **Tansport** ossia trasporto di sedimento uniforme lungo spiaggia, è un software sviluppato dalla W | L Delft Hydraulics per poter simulare i processi di trasporto e le morfodinamiche connesse.

UNIBEST è una suite composta da due sub-moduli integrati:

- UNIBEST-CL: per la modellazione delle dinamiche costiere
- UNIBEST-LT: per la determinazione del trasporto longitudinale.

Il modulo LT è dedicato al calcolo delle correnti longitudinali ed al trasporto del propagazione d'onda che trasforma gli inputs d'onda provenienti da largo tenendo conto dei principali processi di rifrazione lineare e di dissipazione non lineare dovuti alla frangenza ed alla dissipazione per attrito col fondale marino (Battjes and Stive, 1984). Il trasporto longitudinale e la distribuzione trasversale sono calcolati nel modulo LT in accordo con le formule:

CERC (1984)

Engelund, Hansen (1979)

Bijker (1967, 1971)

Van Rijn (1992)

Bailard (1981)

Van de Meer-Pilarczyk (1992)

La procedura computazionale può tenere presente qualsiasi regime ondoso o di marea in modo da poter permettere la stima del trasporto totale longitudinale.

Il modulo CL è studiato per simulare i cambiamenti lungo costa creati dai gradienti di trasporto longitudinale lungo costa sulle basi della teoria ad una linea che fu per prima presentata da Pelnard Considère (1956). In questa teoria la costa è schematizzata da una linea singola ed il movimento di questa linea è descritto da una funzione legata al tempo ed alla posizione lungoriva. L'area attiva del profilo del fondo è assunto muoversi parallelo a se stesso senza cambiare aspetto sia in erosione che in accrescimento.

Possono essere introdotti varie condizioni al contorno in modo da poter rappresentare differenti scenari costieri. Lungo la costa possono essere definiti vari punti di prelievo o asporto di sedimento in maniera tale da poter simulare apporti fluviali,



fenomeni di subsidenza prelievi di sabbia dovuti a cave marine, o perdite di sabbia per trasporto trasversale.

I dati di impostazione del modello CL sono quelli che provengono dal modulo LT. I due moduli sono interconnessi grazie ad un *link* di comunicazione dedicato che comunica attraverso un file dedicato di interscambio. I calcoli effettuati da UNIBEST –LT sono eseguiti per una serie di angoli di costa, ovvero si creano una serie di funzioni di trasporto legate a varie condizioni riscontrabili lungo la costa disomogenee tra loro per differente angolo di orientazione della costa, batimetria area o profilo attivo di spiaggia. Sono modellati anche i cambiamenti dovuti a trasporto di tipo trasversale grazie all'utilizzo di zone di prelievo puntuali che siano in grado di simulare la perdita di sedimento.

La teoria di Pelnard-Considère fornisce le equazioni base per la descrizione di processo morfologici della evoluzione della linee di costa dovuto a gradienti nel trasporto solido longitudinale. Queste equazioni conducono alla ben nota equazione di diffusione per la cui risoluzione sono necessarie le condizioni iniziali ed al contorno.

Per la teoria ad una linea il profilo di costa è schematizzato secondo la Figura 47. Dove l'asse x è scelto lungo la iniziale linea di riva. La normale alla linea di riva costituisce l'asse Y che è scelto in un direzione ortogonale alla linea di riva originale.

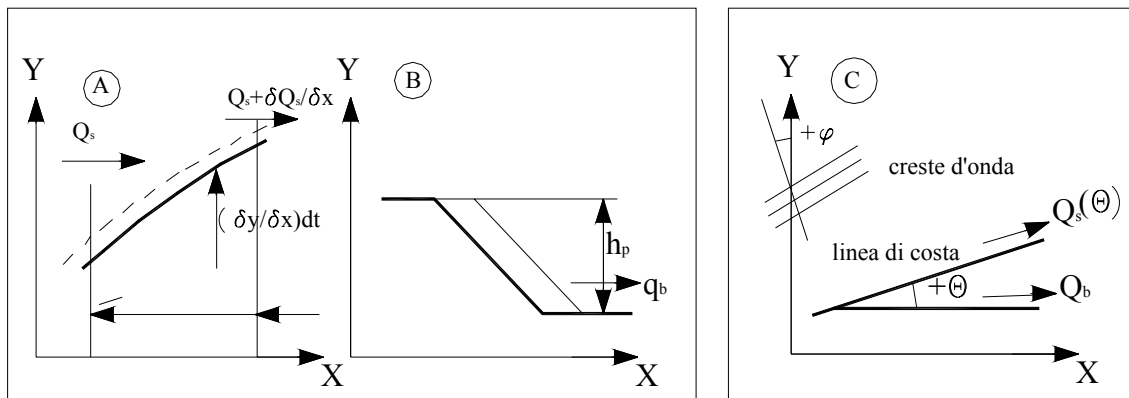


Figura 47: figure della schematizzazione utili alla comprensione della teoria ad una linea.

Il profilo batimetrico caratterizzante la spiaggia si suppone muoversi orizzontalmente lungo tutto il profilo attivo sia in caso di erosione che di avanzamento, pertanto la

pendenza di spiaggia non subisce mutazioni Il limite superiore del profilo di spiaggia è individuato alla cima del profilo attivo.

Per simulare i cambiamenti costieri si utilizzano l'equazione di continuità e di moto unitamente alle condizioni iniziali e di contorno.

$$h_p \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} + q_b = 0 \quad (3)$$

Dove

$Q_s$  è il trasporto totale,

$y$ , la posizione della linea di costa

$h_p$  il profilo di costa attiva,

$q_b$  eventuali prelievi o perdite di sedimento

L'equazione della continuità:

$$\left( Q_s + \frac{\partial Q_s}{\partial x} dx \right) dt - Q_s dt = - \frac{\partial y}{\partial x} h_p dx \cdot dt + q_b \cdot h_p dx \cdot dt \quad (4)$$

L'equazione di moto nella forma (equazione di Pelnard-Considerere):

$$Q_s(\Theta) = Q_{s0} - S_1 \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \quad (5)$$

La cui combinazione porta all'equazione di diffusione:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{s_1}{h_p} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (6)$$

La cui soluzione analitica può essere risolta.

In UNIBEST la variazione di capacità di trasporto dovuto alla diversa orientazione costiera è approssimata dal calcolo del trasporto  $Q_s$  sulle basi del regime ondoso per un determinato numero di angoli della costa.

Questo fa sì che l'angolo  $s_1$  non abbia un singolo valore ma sia riprodotto da una funzione che dipende dall'effettiva orientazione della linea di costa. Questa funzione è approssimata da una funzione esponenziale. Della forma:

$$Q_s = c_1 \theta_r e^{(c_2 \theta_r)^2} \quad (-)$$

Dove

$$\theta_r = \theta - \theta_e \quad (-)$$

È l'angolo di costa relativo e  $\theta_e$  è l'angolo di equilibrio.

I coefficienti  $c_1$  e  $c_2$  sono determinati da un algoritmo iterativo del programma in base al metodo dei minimi quadrati.

Le funzioni di trasporto sono calcolate attraverso il modulo LT per zone omogenee di spiaggia (profilo trasversale del fondo, orientamento della linea di costa, profondità di chiusura ecc). sulla base della batimetria, condizioni di moto ondoso, caratteristiche del sedimento ed orientazione della linea di costa su cui esse insistono.

Nel corso del presente studio, sono state calcolate 10 funzioni di trasporto, per ognuna delle quali è stato necessario definire:

- Regime ondoso
- Profilo trasversale del fondo
- Parametri d'onda
- Parametri di trasporto

Il regime ondoso è calcolato non in base ad un parametro sintetico ma sulla base degli eventi che effettivamente si sono registrati nel luogo nel periodo 01/07/2001÷31/01/2004.

Nel nostro caso si sono considerate tutte le onde registrate con  $H_s > 0.5\text{m}$ , ovvero tutti gli eventi di moto ondoso (72 onde) in grado di fornire un significativo apporto al trasporto litoraneo.

Le condizioni di moto ondoso immesse nel modello per il calcolo sono quelle estratte nei punti più prossimi alla profondità di chiusura (vedi par3.3.1.1).

Queste vengono poi mediate dal programma in base alla percentuale annua di occorrenza, in modo da poter dedurre le funzioni di trasporto medio.

Il calcolo necessario alla determinazione delle condizioni d'onda locali è stato effettuato attraverso il modello SWAN.

Il profilo trasversale è stato desunto dai dati del rilievo batimetrico *multibeam* effettuato nel 2004. I parametri d'onda utilizzati, in assenza di altre indicazioni sono stati quelli di *default*.

La formula di trasporto utilizzata per il calcolo è la formula di Bijker la cui descrizione è rinviata al paragrafo seguente. Tale formula per la definizione delle caratteristiche del sedimento impone la richiesta del D50, D90 e della velocità di sedimentazione che nel nostro caso sono quelle desunte dalle analisi granulometriche

meglio esposte nel par.2.3.3. Le velocità di sedimentazione immesse sono quelle desunte dalle tavole di sedimentazione presenti in letteratura. Per il sedimento  $D_{50}=0.38$  è stata utilizzata una velocità pari a 0.05156 m/s e per il sedimento  $D_{50}=0.20$  mm è stata utilizzata una velocità di sedimentazione pari a 0.02522 m/s.

Una volta ottenute le curve di trasporto il programma immagazzina le informazioni utili alla determinazione del trasporto nei così detti RAY-files.

Questi ultimi possono essere definiti in diversi punti della costa omogenei per condizioni senza dover definire gli stessi in ciascun punto della griglia di calcolo grazie ad una automatica interpolazione compiuta dal programma.

L'asse x della griglia di calcolo è costituito da una linea curva e l'asse Y dalle normali perpendicolari ad essa. Questo sistema "curvo" può essere immesso grazie a coordinate reali, ovvero nel sistema di coordinate locali in cui si sta lavorando. Gli angoli di attacco d'onda sono definiti secondo la convenzione "°N".

### 3.3.1 FORMULA DI TRASPORTO

Il trasporto di sedimento lungo può essere calcolato usando una delle formule per il trasporto di sedimento disponibili tra cui: CERC, Engelund-Hansen, Bijker, v. Rijn e Bailard per le sabbie e la formula di Van der Merr-Pilarekzyk per i ciottoli.

Nel nostro caso si è fatto uso della formula Bijker che è quella che maggiormente è testata in situazioni analoghe<sup>28</sup>..

$$S = S_b + S_s \text{ (m}^3\text{/m/s)} \quad (7)$$

Dove:

$S_b$ = trasporto di sedimento sul fondale

$S_s$ = trasporto del sedimento in sospensione

La formulazione di  $S_b$  è:

$$S_b = bD_{50} \frac{v}{C} \sqrt{g} e^{\left[ \frac{-27\Delta D_{90} C^2}{\mu v^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \xi \left( \frac{u_b}{v} \right)^2 \right\}} \right]} \quad (8)$$

In cui la velocità media di corrente è rappresentata da  $v$  e l'effetto delle onde da  $u_b$ .

---

<sup>28</sup> WL|Delft Hydraulics (1992). UNIBEST, A software suite for simulation of sediment transport processes and related morphodynamics of beach profiles and coastline evolution. Model description and validation. delft hydraulics Report H454.14, 1992

Le caratteristiche del sedimento di cui la formulazione tiene conto sono:

$D_{50}$  = diametro medio della curva cumulata granulometrica (m)

$D_{90}$  = diametro 90% della curva cumulata granulometrica (m)

$\Delta$  = densità relativa

$r_c$  = rugosità del fondale (m)

$\rho_s$  = densità del sedimento

$w$  = velocità di sedimentazione del sedimento (m/s)

$u_b$  = velocità orbitale vicino il fondale (m/s)

$\omega$  = frequenza d'onda (rad/s)

da questi parametri sono derivati i seguenti parametri:

$C$  = coefficiente di Chezy =  $18 \log (12 d/r_c)$

$C_{90} = 18 \log (12 d/D_{90})$  (9)

$$\mu = (C/C_{90})^{3/2}$$

$$f_w = e^{\left[ -5.977 + 5.223 \left( \frac{u_b}{\omega r_c} \right)^{-0.194} \right]}$$
 (10)

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}}$$
 (11)

Il coefficiente  $b$  varia tra 1 e 5.

La formulazione di  $S_s$  ( $m^3/m/s$ ) è:

$$S_s = 1.83 S_b \left\{ I_1 \ln \left( \frac{33d}{r_c} \right) + I_2 \right\}$$
 (12)

$$\text{Con } I_1 = R \int_{\frac{r_c}{d}}^1 \left[ \frac{(1-y)}{y} \right]^{z_s} dy$$
 (13)

$$I_2 = R \int_{\frac{r_c}{d}}^1 \ln y \left[ \frac{(1-y)}{y} \right]^{z_s} dy$$
 (14)

$$R = \frac{.216 \left( \frac{r_c}{d} \right)^{z_s-1}}{\left( 1 - \frac{r_c}{d} \right)^{z_s}}$$
 (15)

$$z_* = \frac{w}{k v_*} (k = 0.4) \quad (16)$$

$$v_* = \sqrt{g} \frac{v}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{u_b}{v} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (17)$$

### 3.3.1.1 DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITÀ DI CHIUSURA

La profondità di chiusura, utile alla determinazione del profilo trasversale da immettere ne modello, è stata calcolata con la formula di Hallermeier<sup>29</sup> (1), anch'essa ricavata per il caso di fenomeni di inizio del moto dei sedimenti per l'azione delle onde, sulla scorta dei dati effettivamente rilevati dalla boa ondometrica.

$$D_c = 2,28 \cdot H_0 - 10,9 \cdot \frac{H_0^2}{L_0} \quad (18)$$

dove  $H_0$  esprime l'altezza significativa a largo associata alla frequenza di accadimento pari a 12 ore/anno; nel caso presente viene assunto il valore medio di 2.58 m, mentre  $L_0$  rappresenta la lunghezza d'onda al largo. Il valore di chiusura ottenuto è di 5.12 m e risulta essere perfettamente in accordo con i risultati dei rilievi batimetrici.

### 3.3.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

La calibrazione del modello è stata effettuata con la tecnica del *back-analysis*, la quale prevede la riproduzione dell'evoluzione della linea di riva tra due momenti in cui siano note le rive.

Assunti come invarianti del problema i dati batimetrico, ondometrico e sedimentologico, determinati con esattezza nelle campagne su esposte, ho proceduto iterativamente alla verifica della corretta evoluzione della linea di riva modulando i parametri di trasporto e le perdite di sedimento per cella di calcolo.

Le linee di riva prese in considerazione in fase di calibrazione sono quelle del 2004 e 2007.

Le condizioni al contorno poste sono quelle dell'apporto di sedimento nullo, ovvero si suppone che il Poetto costituisca una unità fisiografica indipendente.

---

<sup>29</sup> Hallermeier R.J, 1983.Sand Transport Limits in Coastal Structure Design,, Proceedings of Coastal Structures' 83, Asce, pp.703-706

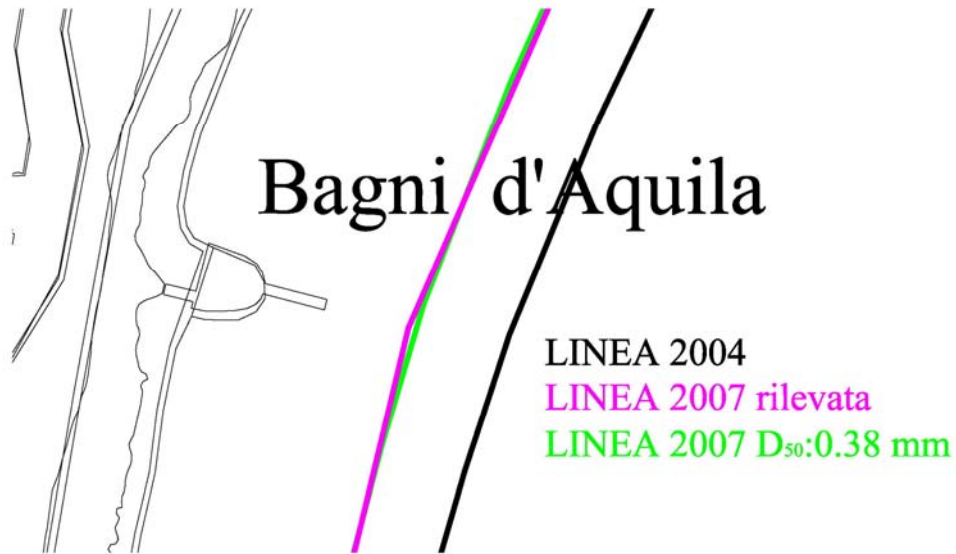


Figura 48: Visualizzazione della sovrapposizione delle linee di riva rilevata e predetta dal modello dopo l'avvenuta calibrazione, in corrispondenza dei bagni D'Aquila.

La granulometria utilizzata è quella scaturita dalla campagna di campionamento da me svolta. I risultati migliori di calibrazione si sono riscontrati imponendo delle perdite di sedimento distribuite nella parte del Poetto di Cagliari. Esse hanno assunto intensità differenti lungo tutto l'arco di spiaggia facendo registrare dei valori di  $8 \div 20 \text{ m}^3/\text{m}/\text{anno}$  nel tratto di spiaggia compreso tra Marina Piccola e la 1° fermata, di  $30 \div 70 \text{ m}^3/\text{m}/\text{anno}$  nel tratto D'aquila-4° fermata,  $10 \div 30 \text{ m}^3/\text{m}/\text{anno}$  nel tratto 4° fermata-stabilimento aeronautica, per poi far registrare valori minimi in corrispondenza dell'Ospedale Marino dove avviene l'avanzamento della linea di riva.

### 3.3.3 RISULTATI

I risultati della calibrazione e delle simulazioni effettuate hanno confermato la presenza di una corrente litoranea con direzione ovest-est.

La calibrazione del modello ha avuto come conseguenza la determinazione delle perdite di volume per trasporto trasversale nella prima parte del Poetto con valori spesso superiori ai  $40 \text{ m}^3/\text{m}/\text{a}$ , con valori massimi in corrispondenza del Lido pari a  $70 \text{ m}^3/\text{m}/\text{a}$ .

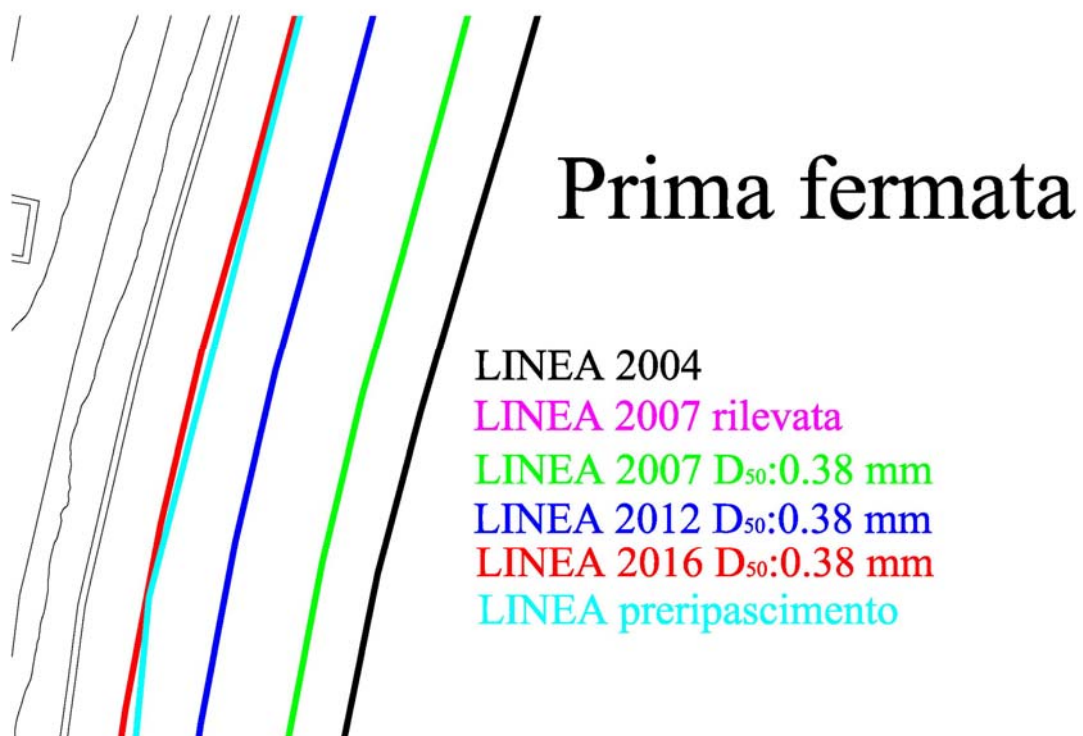


Figura 49: visualizzazione dell'evoluzione della linea di riva fornita dal modello. Il tempo zero di simulazione è stato il 2004. Si nota come il ripascimento perderà la sua efficacia nel 2016 quando, in seguito all'erosione principalmente dovuta all'azione del moto ondoso ed al susseguente trasporto trasversale, arretrerà fino ai livelli registrato prima del ripascimento nella zona del Poetto di Cagliari.

Il punto di “inversione” stabilito dal modello tra la zona oggetto di erosione è quella in avanzamento, è quella dell'Ospedale Marino, dove si registrano trasporti trasversali di sedimento di circa  $6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{a}$ .

Il modello mette in evidenza come le entità del trasporto litoraneo lungo la restante parte del Poetto siano i relativamente piccole: a fronte di una portata solida



longitudinale  $Q_s$  pari a  $48.000 \text{ m}^3/\text{a}$  nella zona compresa tra la prima fermata ed il Lido, si scende a valori di  $5\div 6000 \text{ m}^3/\text{a}$  nella zona della Torre di Carcangiolas.

Il rateo medio annuo di arretramento nella prima parte del Poetto è stabilito in circa  $2.5 \text{ m/a}$ , mentre l'avanzamento della linea di riva nel tratto soggetto ad avanzamento è di circa  $0.4 \text{ m/a}$ . La simulazione ha messo in evidenza che, ferme restando le condizioni al contorno, il profilo di riva raggiungerà nuovamente le condizioni pre-ripascimento tra 9 anni nella zona della prima fermata. Nella restante parte del Poetto si avranno modesti avanzamenti, con punte di accrescimento di fronte all'ospedale marino.

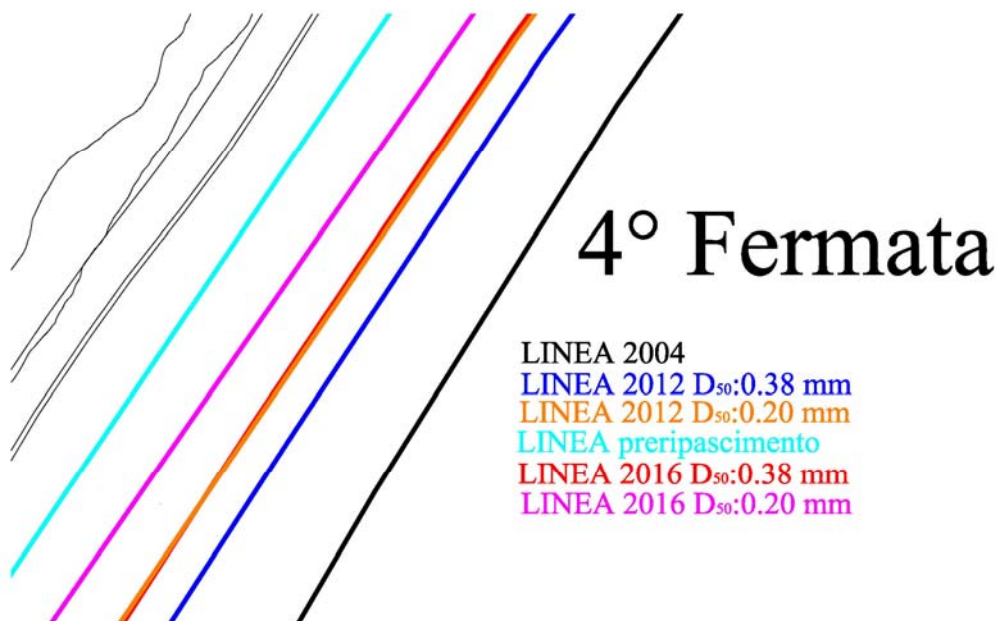


Figura 50: visualizzazione comparata delle linee di riva calcolate dal modello UNIBEST. E' chiara la minore stabilità dell'intervento ipotizzato con  $D_{50}=0.20 \text{ mm}$ . Le linee di riva  $0.20 \text{ mm}$ , nel tratto occidentale della spiaggia, sono costantemente più arretrate rispetto a quelle  $0.38 \text{ mm}$ . La quasi coincidenza delle linee  $2012 \text{ } 0.20$  e  $2016 \text{ } 0.38$  è significativa delle differenti prestazioni offerte dai due materiali.

La calibrazione del modello ad una linea, e delle relative curve di trasporto, mi ha consentito di simulare l'effetto che avrebbe avuto l'inserimento di un sedimento di granulometria inferiore rispetto a quella del materiale effettivamente utilizzato per il ripascimento. Tale operazione è stata possibile agendo sui parametri di trasporto legati al diametro della formula di Bijker. Al posto del  $D_{50}$  e  $D_{90}$  (rispettivamente  $0.38$  e  $0.7 \text{ mm}$ ) impiegati per le simulazioni su esposte, ho utilizzato un  $D_{50}=0.20 \text{ mm}$  e  $D_{90}=0.5 \text{ mm}$ , in linea con un sedimento a granulometria fine quale ancora si

presenta la sabbia in alcuni tratti del Poetto. I risultati hanno dimostrato una minore efficacia in termini di stabilità del litorale all'azione del moto ondoso. Basti pensare che, prendendo a riferimento gli stessi orizzonti temporali, le linee 0.20 mm si presentano sempre più arretrate rispetto a quelle "0.38".

La Figura 50 è particolarmente significativa della differente resa dei due interventi posti a confronto: la linea che si riscontrerebbe nel 2012 all'altezza della quarta fermata con il sedimento  $D_{50}=0.20$  mm è la stessa che si riscontrerà nel 2016 con il sedimento ora in opera.

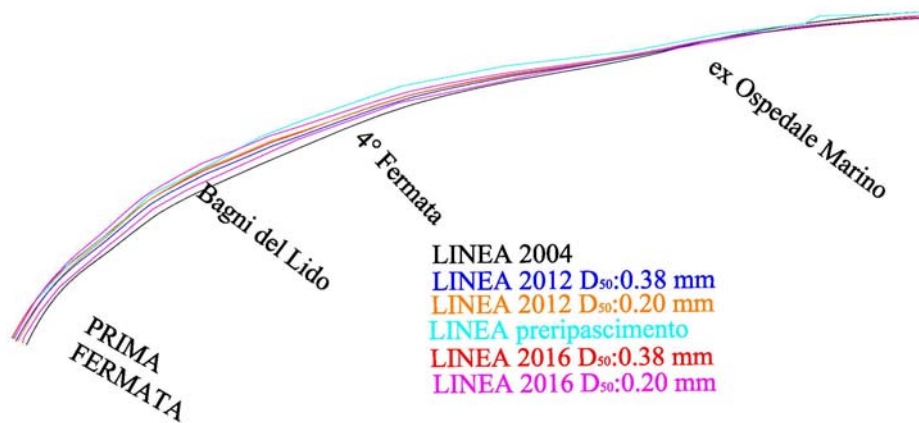


Figura 51: Visualizzazione delle linee di riva così come restituite dal modello.

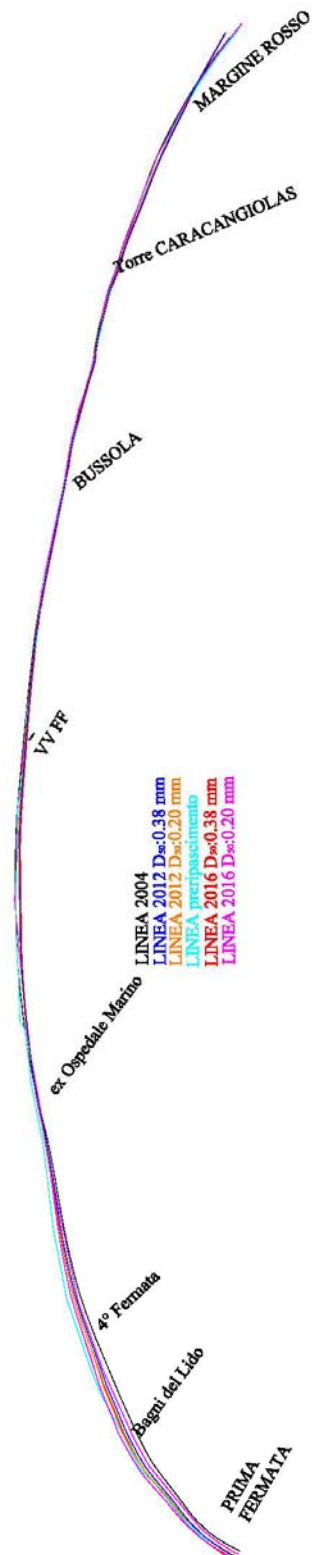


Figura 52: Visualizzazione d'insieme delle linee evolutive del Poetto così come modellate dal programma UNIBEST: In nero, la linea rilevata nel 2004.

### 3.4 DELFT3D

Le simulazioni idromorfodinamiche sono state eseguite con il “DELFT3D Modelling System” sviluppato alla WL Delft Hydraulics e con il “wave model SWAN” sviluppato alla Technical University di Delft (Olanda).

In questo capitolo si dà una breve descrizione dei moduli utilizzati per la realizzazione dello studio di cui questa relazione riporta i risultati.

#### 3.4.1 DELFT3D MODELLING SYSTEM

Il modello numerico è un sistema multimodulare capace di simulare varie fenomenologie tra cui:

- I. Flussi dovuti a marea, correnti di densità e vento;
- II. Propagazione d’onde irregolari direzionalmente orientate su batimetrie irregolari;
- III. Onde che variano dinamicamente (“*time varying*”);
- IV. Variazioni della morfologia bidimensionale;
- V. Qualità dell’acqua.

Esso comprende i seguenti moduli:

- a) *Grid*
- b) *Bathymetry*
- c) *Hydrodynamic*
- d) *Waves*
- e) *Morphology*
- f) *Particle Tracking*
- g) *Far field water quality*.

Ognuno di questi moduli ha a che fare con un particolare aspetto dello studio che si vuole affrontare. Alcuni moduli sono indispensabili per qualsiasi particolare aspetto si voglia studiare; essi, infatti, definiscono la griglia di calcolo e la batimetria entro cui i fenomeni devono essere studiati o la morfologia del fondo; altri, invece, si usano a seconda delle esigenze di studio.

Per particolari approfondimenti sul sistema di modellazione numerica si può far riferimento allo studio pubblicato da Roelvink e Van Banning<sup>30</sup>, nel quale è stato utilizzato sia il modulo idrodinamico che il modulo di qualità dell'acqua.

#### 3.4.1.1 Modulo Idrodinamico (Flow Module)

Il modulo idrodinamico, Delft3D-FLOW è un programma multidimensionale idrodinamico che calcola flussi non stazionari e fenomeni di trasporto risultanti da forzanti di marea e meteorologiche su una griglia curvilinea e ben modellata. Nelle simulazioni 3D il modulo idrodinamico applica le cosiddette trasformazioni di coordinate sigma lungo la verticale, che si risolve in una rappresentazione arrotondata della topografia. Questo approccio ha come risultato un'elevata efficienza di calcolo dovuto ad un costante numero di *layer* sull'intero dominio.

Il modello è basato sulle equazioni complete di Navier-Stokes con l'approssimazione per acque basse. Le equazioni sono risolte con una procedura altamente accurata incondizionatamente stabile. Le caratteristiche supportate sono:

- Tre sistemi di coordinate: rettilineo, curvilineo e sferico nelle direzioni orizzontali e una trasformazione in coordinate sigma sulla verticale.
- Simulazione di piani intertidali attraverso il “*flooding*” ed il “*drying*” (contorno variabile)
- Forza di Coriolis e forzanti mareali.
- Gradienti di densità dovuti alla non uniforme temperatura e distribuzione di concentrazione salina.
- Inclusione di termini di gradienti di densità (pressione) nell'equazione dei momenti (densità indotta da flussi)
- Modello di turbolenza per tenere in conto la viscosità di turbolenza verticale e della diffusività basata sul concetto di “*Eddy viscosity*”.
- Sforzi tangenziali esercitati sul fondo da turbolenze di flusso basate sulla formula quadratica di Chézy o di Manning.

---

<sup>30</sup> ROELVINK, J.A., AND G.K.F.M. VAN BANNING, 1994. Design and development of Delft3D and application to coastal morphodynamics. Hydroinformatics 1994, Verwey, Minns, Babovic & Maksimovic (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 451-455.

- Sforzi del vento sulla superficie modellati sulla formula di frizione quadratica.
- Simulazione dello scambio termico di effluenti termali, scarichi fognari o di impianti di raffreddamento nel campo computazionale (modulo di avvezione-diffusione).
- Conversione automatica di coefficienti bidimensionali in tridimensionali.
- Gli effetti di flussi caldi attraverso la superficie libera.
- Possibilità di rilascio di corpi spia dei quali si può osservare la traiettoria a simulazione ultimata.
- Influenza del movimento vorticoso nei flussi idrodinamici (per esempio nelle anse dei fiumi).

I campi di applicazione del modello sono vari e vanno dalla modellazione dell'intrusione salina negli estuari dei fiumi, alla immissione di acqua fresca nelle baie, alla stratificazione termica nel mare e nei laghi. Nel nostro studio, tuttavia, si sono utilizzate soprattutto le possibilità del modello di modellare i flussi idrodinamici dovuti ad onde e di calcolare e modellare il trasporto di sedimenti.

Il modulo FLOW si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per un fluido incompressibile, sotto le assunzioni di Boussinesq per le acque basse. Nell'equazione di momenti in direzione verticale non si tiene conto dell'accelerazione verticale il che porta all'equazione della pressione idrostatica.

Le equazioni su cui si basa il modello sono:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (19)$$

dove:

$\zeta$  è il pelo libero dell'acqua al di sopra del piano di riferimento (a  $z = 0$ )

$d$  è la profondità dell'acqua al di sotto del piano di riferimento

$\xi, \eta$  sono le direzioni locali di riferimento della griglia;

H altezza totale è data dalla somma di  $\zeta + d$ .

Q nell'equazione rappresenta i contributi per unità d'area delle immissioni o prelievi di acqua, evaporazioni o precipitazioni:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (20)$$

dove  $q_{in}$  e  $q_{out}$  sono le fonti locali di prelievo ed immissione per unità di volume e P e E gli apporti globali dovuti ad evaporazione e precipitazioni.

$\sigma$  è la coordinata definita lungo la verticale definita come:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

L'equazione di continuità nelle direzioni orizzontali sono così definite

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \xi} - fu = \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \end{aligned} \quad (22)$$

Le variazioni di densità non sono tenute in conto fatta eccezione per i termini di pressione baroclina,  $P^{\xi}$  e  $P^{\eta}$  rappresentano i gradienti di pressione. Le forze  $F^{\xi}$  e  $F^{\eta}$  rappresentano lo sbilanciamento degli sforzi orizzontali di Reynolds nell'equazione dei momenti.

$M_{\xi}$  e  $M_{\eta}$  rappresentano i contributi dovuti a sorgenti e attingimenti del momento dovuto a forze esterne (forze dovute a strutture idrauliche, scarichi o attingimenti di acqua, sforzi dovute alle onde ecc.).

la velocità verticale  $\omega$  nel sistema di coordinate di adattamento sigma è calcolato grazie all'equazione di continuità:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (23)$$

L'equazione del trasporto è formulata in una forma conservativa nelle coordinate ortogonali curvilinee nella direzione orizzontale e nella coordinata sigma lungo la verticale:

$$\frac{\partial(d+\zeta)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} =$$

$$\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \left[ D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] - \lambda_d (d+\zeta)c + S$$
(24)

con  $\lambda_d$  che rappresenta il processo di decadimento di primo ordine ed S i termini di prelievo ed immissione.

La formula che lega il trasporto alle forze d'onda è quella di Bijker (1971). Essa è una formulazione frequentemente utilizzata nelle aree costiere in presenza di correnti generate da moto ondoso.

Il trasporto dei sedimenti sul fondo e quelli in sospensione sono trattati separatamente ovvero:

$$S = S_b + S_s$$
(25)

dove  $S_b$  è il trasporto di sedimenti sul fondo e  $S_s$  è il trasporto di sedimento in sospensione<sup>31</sup>.

La formulazione di Van Rijn, sebbene più di più recente concezione, non è stata utilizzata vista la sua applicabilità ai soli casi di trasporto dovuto a flussi senza onde. La Ribberink-Van Rijn (1994), pur presentando buoni risultati, paragonabili a quelli della Bijker, non è ritenuta affidabile per applicazioni pratiche.

Dal punto di vista numerico, il modello discretizza l'intera area in celle-griglia sul piano orizzontale. L'insieme delle equazioni differenziali è così trasformato nello spazio discretizzato. Ogni cella contiene quindi un valore di battente idrico, di batimetria, di velocità nella direzione x della griglia, ed un valore nella direzione y.

Tutti questi valori sono allocati in uno schema denominato "griglia sfalsata", poiché ogni valore è definito in punti diversi della stessa cella della griglia. L'insieme delle equazioni differenziali parziali è risolto utilizzando un metodo alle differenze finite.

---

<sup>31</sup> Per una dettagliata visione delle formulazioni utilizzate si rimanda agli User Manual di Delft3D.



Il modulo FLOW utilizza il cosiddetto metodo ADI, Alternating Direction Implicit introdotto da Leendertse (1967, 1971, 1973) per le equazioni nelle “shallow waters”. Il metodo ADI divide ogni passo di calcolo in due fasi. Ognuna di esse dura mezzo “time step” durante le quali tutti i termini dell’equazioni del modello vengono risolte con un’accuratezza almeno del secondo ordine.

Il vantaggio del metodo è che i livelli idrici e le velocità integrate implicitamente sono accoppiate lungo le linee della griglia facendo sì che si crei un sistema di equazioni con una piccola estensione di banda. La sostituzione delle equazioni di moto nelle equazioni di continuità, porge un sistema tridiagonale per le equazioni dei livelli idrici. Dopo aver calcolato i livelli idrici, sostituendoli a ritroso nelle equazioni discretizzate del momento, si ottengono le velocità.

In termini vettoriali il metodo ADI è:

Passo 1:

$$\frac{\mathbf{U}^{1+\frac{1}{2}} - \mathbf{U}^1}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \mathbf{U}^{1+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y \mathbf{U}^1 + B \mathbf{U}^{1+\frac{1}{2}} = \mathbf{d} \quad (26)$$

Passo 2:

$$\frac{\mathbf{U}^{1+1} - \mathbf{U}^{1+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \mathbf{U}^{1+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y \mathbf{U}^{1+1} + B \mathbf{U}^{1+1} = \mathbf{d} \quad (27)$$

con:

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

e:

$$B = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, \quad (30)$$

con  $\lambda$  coefficiente linearizzato di dissipazione sul fondo. Per migliorare la stabilità la dissipazione sul fondo è integrata implicitamente in ogni passo.  $\frac{1}{d}$  è il secondo termine dell'equazione contenente le forze esterne quali vento, e pressione atmosferica

### 3.4.1.2 Trasporto Di Sedimento E Morfologia: Approfondimenti

#### 3.4.1.2.1 Formulazioni Generali

Il modulo trasporto di sedimento e la morfologia da la possibilità di calcolare sia il trasporto in sospensione che di fondo del sedimento per entrambi i tipi di sedimento coesivo ed in coesivo. Per la schematizzazione, il modello distingue “fango” (trasporto di sedimento in sospensione), “sabbia” (trasporto in sospensione e sul fondo di sedimento non coesivo) e “bed-load” (trasporto totale o solamente trasporto sul fondo di sedimento non-coesivo). Un modello può contenere fino a 99 frazioni di sedimento “in sospensione” ovvero, per ciò che si è appena premesso, “sabbie e fanghi” ed un numero arbitrario di frazioni “bed-load” in relazione alla capacità di calcolo del computer. La sola differenza tra “bed-load” e frazioni “sabbiose” sta nel fatto che la frazione “bed-load”. Se il trasporto in sospensione è trascurabile ( o per diametro del sedimento o per formulazione di trasporto scelta), l’approccio “bed-load” è il più efficiente. Il modello tiene conto delle interazioni sabbia-fango, ove presenti.

#### 3.4.1.2.2 Trasporto in sospensione

Il trasporto tridimensionale di sedimento in sospensione è calcolato risolvendo la equazione tridimensionale di conservazione della massa per il sedimento in sospensione:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^{(1)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(1)}}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s^{(1)})c^{(1)}}{\partial z} + \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x}^{(1)} \frac{\partial c^{(1)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y}^{(1)} \frac{\partial c^{(1)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z}^{(1)} \frac{\partial c^{(1)}}{\partial z} \right) = 0, \end{aligned} \quad (31)$$

Dove

$c^{(1)}$  Densità di massa della l-esima frazione (1) [kg/m<sup>3</sup>]

$u, v$  and  $w$  Componenti della velocità di flusso [m/s]

$\varepsilon_{s,x}^{(1)}, \varepsilon_{s,y}^{(1)}$  and  $\varepsilon_{s,z}^{(1)}$  Diffusività turbolenta della l-esima frazione (1) [m<sup>2</sup>/s]

$w_s^{(1)}$  Velocità di sedimentazione della l-esima frazione (1) [m/s]

Le velocità locali e le diffusività turbolente sono basate sui risultati dei calcoli idrodinamici.

#### 3.4.1.2.2.1 Effetto del sedimento sulla densità del fluido

DELFT3D-FLOW nella sua formulazione standard una relazione empirica (Eckart, 1958) per correggere la densità dell'acqua per tenere conto anche la variazione di temperatura e salinità. Per il trasporto di sedimento questa relazione è estesa per includere l'effetto di densità delle frazioni di sedimento nel mix di fluidi. Questo è ottenuto grazie all'aggiunta (per unità di volume) della massa di tutte le frazioni di sedimento, e dalla sottrazione della massa d'acqua sostituita. In termini matematici ciò si traduce in:

$$\rho_{mix}(S, c^{(1)}) = \rho_w(S) + \sum_{l=1}^{l_{sed}} c^{(l)} \left( 1 - \frac{\rho_w(S)}{\rho_s^{(l)}} \right) \quad (32)$$

Dove:

$\rho_w(S)$	Densità specifica dell'acqua ad una determinata concentrazione salina $S$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$S$	Concentrazione salina [ppt]
$\rho_s^{(1)}$	l-esima densità specifica (1) [kg/m <sup>3</sup> ]
$l_{sed}$	Numero di frazioni

Gradienti orizzontali di densità possono creare correnti di densità. Gradienti verticali di densità possono avere effetti significativi nella distribuzione verticale. Si può tenere presente o ignorare questo effetto nella computazione semplicemente selezionando o deselegionando l'opzione nell'interfaccia utente.

#### 3.4.1.2.2.2 Velocità di sedimentazione

La velocità di sedimentazione  $w_s^{(1)}$  per sabbia e fango sono differenti nelle loro formulazioni. In fluidi molto densi, la velocità di sedimentazione di una singola particella è ridotta in conseguenza della presenza delle altre. Per considerare la velocità di sedimentazione ostacolata si utilizzano Richardson and Zaki (1954) e si determina la velocità di sedimentazione in una mistura sedimento-fluido come funzione di concentrazione di sedimento e velocità di sedimentazione non ostacolata:

$$w_s^{(1)} = \left(1 - \frac{c_s^{tot}}{CSOIL}\right)^5 w_{s,0}^{(1)} \quad (33)$$

Dove CSOIL è la densità di riferimento,  $w_{s,0}$  è la velocità di sedimentazione specifica per il sedimento "base". La concentrazione totale di massa  $c_m^{tot}$  è la somma della concentrazione delle frazioni di sedimento:

$$c_s^{tot} = \sum_{l=1}^{l_{sed}} c^{(l)} \quad (34)$$

Poiché la velocità di sedimentazione è funzione di tutte le concentrazioni di sedimento, ogni frazione di sedimento ha la velocità di sedimentazione che è funzione di spazio e tempo.

#### 3.4.1.2.2.3 Sedimento non coesivo

Per il trasporto di sedimento non coesivo, il programma utilizza l'approccio di Van Rijn (2000) ma altri possono essere utilizzati. La velocità di sedimentazione per una componente non coesiva di sedimento ("sabbia") è calcolata con il metodo di Van Rijn (1993). Questa formulazione è correlata al diametro del sedimento in sospensione:

$$\begin{aligned}
 w_{s,0}^{(1)} &= \frac{(s^{(1)} - 1)g d_s^{(1)2}}{18\nu}, & 65 \mu m < d_s \leq 100 \mu m \\
 w_{s,0}^{(1)} &= \frac{10\nu}{d_s} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s^{(1)} - 1)g d_s^{(1)3}}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right], & 100 \mu m < d_s \leq 1000 \mu m \\
 w_{s,0}^{(1)} &= 1.1 \left[ (s^{(1)} - 1)g d_s^{(1)} \right]^{0.5}, & 1000 \mu m < d_s
 \end{aligned} \tag{35}$$

Dove:

- $s^{(1)}$  Densità relativa  $\rho_s^{(1)} / \rho_w$  of dell'1-esima frazione(1)
- $d_s^{(1)}$  1-esimo diametro(1)
- $\nu$  Coefficiente di viscosità cinemtica dell'acqua [m<sup>2</sup>/s]

$d_s^{(1)}$  è il diametro nominale del sedimento sospeso fornito inizialmente.

#### 3.4.1.2.3 Trasporto sul Fondo di sedimento non coesivo

Il trasporto sul fondo (o più semplicemente il trasporto totale a seconda della formulazione che si adotta) è calcolato per tutte le frazioni di "sabbie" e "bed-load" secondo il seguente schema: prima di tutto viene calcolata l'intensità e direzione del trasporto in corrispondenza delle celle di calcolo utilizzando la formulazione di trasporto selezionata; successivamente i tassi di trasporto in corrispondenza delle interfacce corrette per effetto delle pendenze del fondo, disponibilità e composizione del sedimento.

Alcune delle formulazioni di trasporto necessitano di una direzione per il trasporto sul fondo, altre solo l'intensità.

3.4.1.2.3.1 Formula di Van Rijn (1993)

Van Rijn distingue tra trasporto di sedimento che avviene al di sotto di una soglia di riferimento e sedimento in sospensione al di sopra di tale soglia. Il sedimento è introdotto nella colonna d'acqua attraverso l'immissione di una concentrazione di riferimento in corrispondenza della citata altezza di riferimento. Tale concentrazione è calcolata in accordo con la formulazione di Van Rijn (2000):

$$c_a^{(1)} = 0.015 \rho_s^{(1)} \frac{d_{50}^{(1)} (T_a^{(1)})^{1.5}}{a (D_*^{(1)})^{0.3}} \quad (36)$$

dove:

$c_a^{(1)}$  Concentrazione di massa di sedimento all'altezza  $a$

Per poter risolvere questa espressione devono essere calcolate le seguenti quantità:

$D_*^{(1)}$  Diametro adimensionale della particella:

$$D_*^{(1)} = d_{50}^{(1)} \left[ \frac{(s^{(1)} - 1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (37)$$

$T_a^{(1)}$  Sforzo di taglio sul fondo adimensionale :

$$T_a^{(1)} = \frac{(\mu_c^{(1)} \tau_{b,cw} + \mu_w^{(1)} \tau_{b,w}) - \tau_{cr}^{(1)}}{\tau_{cr}^{(1)}} \quad (38)$$

$\mu_c^{(1)}$  Fattore di efficienza di corrente:

$$\mu_c^{(1)} = \frac{f_c'^{(1)}}{f_c} \quad (39)$$

$f_c'^{(1)}$  Fattore di frizione:

$$f_c'^{(1)} = 0.24 \left[ \log_{10} \left( \frac{12h}{3d_{90}^{(1)}} \right) \right]^{-2} \quad (40)$$

$f_c^{(1)}$  Fattore di frizione totale:

$$f_c^{(1)} = 0.24 \left[ \log_{10} \left( \frac{12h}{k_s} \right) \right]^{-2} \quad (41)$$

$\tau_{b,cw}$  Sforzo di taglio sul fondo dovuto alla presenza di onde.

Notare che la velocità  $u_*$  è calcolata in maniera tale che il fattore di interazione d'onda di Van Rijn's  $\alpha_{cw}$  non sia richiesto.

$$\tau_{b,cw} = \rho_w u_*^2 \quad (42)$$

$\mu_w^{(1)}$  Fattore di efficienza d'onda:

$$\mu_w^{(1)} = \max \left( 0.063, \frac{1}{8} \left( 1.5 - \frac{H_s}{h} \right)^2 \right) \quad (43)$$

$\tau_{b,w}$  Sforzo di taglio sul fondo dovuto alla presenza di onde:

$$\tau_{b,w} = \frac{1}{4} \rho_w f_w (\hat{U}_\delta)^2 \quad (44)$$

$f_w$  Fattore di frizione sul fondo dovuto ad onde:

$$f_w = \exp \left[ -6 + 5.2 \left( \frac{\hat{A}_\delta}{k_{s,w}} \right)^{-0.19} \right] \quad (45)$$

Per evitare un'eccessiva richiesta di dati da parte la rugosità del fondo  $k_{s,w}$  è calcolata utilizzando l'altezza stimata delle ripple utilizzando la relazione:

$$k_{s,w} = RWAVE \Delta_r, \text{ con } \Delta_r = 0.025 \text{ e limiti: } (0.01\text{m} \leq k_{s,w} \leq 0.1\text{m}), \quad (46)$$

dove:

**RWAVE** Fattore di aggiustamento definito a priori solitamente tra i valori 1-3, di default = 2.

$\tau_{cr}^{(1)}$  Sforzo di taglio sul fondo critico:

$$\tau_{cr}^{(1)} = (\rho_s^{(1)} - \rho_w) g d_{50}^{(1)} \theta_{cr}^{(1)}. \quad (47)$$

$\theta_{cr}^{(1)}$  Il parametro di soglia  $\theta_{cr}^{(1)}$  è calcolato in accordo con la classica formula di Shields modellata da Van Rijn (1993) come funzione del diametro adimensionalizzato  $D_*$ . Questo per evitare processi iterativi. Notare che in questa espressione il simbolo  $D_*$  è stato utilizzato laddove sarebbe stato più corretto utilizzare  $D_*^{(1)}$ :

$$\begin{aligned} \theta_{cr}^{(1)} &= 0.24 D_*^{-1}, & 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr}^{(1)} &= 0.14 D_*^{-0.64}, & 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr}^{(1)} &= 0.04 D_*^{-0.1}, & 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr}^{(1)} &= 0.013 D_*^{0.29}, & 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr}^{(1)} &= 0.055, & 150 < D_* \end{aligned} \quad (48)$$

$a$  Altezza di riferimento di Van Rijn's

$\hat{A}_\delta$  Escursione orbitale di picco sul fondo  $\hat{A}_\delta = \frac{T_p \hat{U}_\delta}{2\pi}$ .

$d_{50}^{(1)}$  Diametro mediano del sedimento

$d_{90}^{(1)}$  passante al 90%:

$$d_{90}^{(1)} = 1.5 d_{50}^{(1)}$$

$h$  Profondità

$k_a$  Rugosità del fondo apparente in presenza di onde

$$k_a \leq 10 k_s$$

$k_s$  Altezza effettiva di rugosità del fondo definite dall'utente

$k_{s,w}$  Altezza effettiva di rugosità del fondo calcolata dalla altezza della ripple

$u_z$  Velocità presa in corrispondenza dello strato inferiore.



$\hat{U}_\delta$	Velocità di picco al fondo: $\sqrt{2} \times \text{RMS}$ velocità orbitale al fondo, estratta dal modulo WAVE.
$z_u$	Altezza sopra il fondo della velocità ( $u_z$ ) usata nel calcolo dello sforzo di taglio dovuto a corrente
$\Delta_r$	Altezza di ripple stimata
$\delta_m$	Spessore dello strato di miscelazione dovuto ad onda come da formulazione Van Rijn (1993): $3\delta_w$ (and $\delta_m \geq k_a$ )
$\delta_w$	Spessore dello strato limite d'onda: $\delta_w = 0.0782 \hat{A}_\delta \left( \frac{\hat{A}_\delta}{k_{s,w}} \right)^{0.25}$

### 3.4.2 IMPOSTAZIONI DEL MODELLO

La Tabella 14 racchiude i valori dei parametri e delle formulazioni utilizzate per le simulazioni. È importante notare che il modello tiene in conto anche altri fattori quali le forze di Coriolis calcolabili dallo stesso grazie ai valori di latitudine proprie della zona di interesse.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Scabrezza del fondo	Chezy uniforme 65 m <sup>1/2</sup> /s
Eddy viscosity	Uniforme 1 m <sup>2</sup> /s
Intervallo di tempo	3 s
Accelerazione g	9.81 m/s <sup>2</sup>
Densità dell'acqua	1025 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura	15 °C
Salinità	38 ppt
Formulazione degli sforzi dovuti ad onde	Bijker
D <sub>50</sub>	0.38 mm
Spessore strato iniziale di sedimento	3.00 m

Tabella 14: valori immessi nel modello idro-morfodinamico

Come condizioni al contorno, si sono imposti i valori di variazione di marea attraverso le costanti armoniche fornite dalle Tavole di marea dell'I.I.M.M. di Genova per il porto di Cagliari.

Tali valori, pur non essendo di grande importanza ai fini del movimento di sedimenti, sono stati presi in esame per fornire il quadro più verosimile possibile.

Dalla tabella si nota che è stato imposto uno strato costante di sedimento pari a 3 m.

Il modello consente una mappatura del sedimento che può essere quindi definito nella sua disponibilità. La presenza di *Posidonia* o di rocce limita il trasporto litoraneo. Alla luce di ciò, ho perimetrato le zone della *Posidonia* ottenute l'analisi delle foto aeree, e sottraendole dal computo totale delle aree soggette ad erosione.

### 3.4.3 RISULTATI MODELLO DELFT3D

I risultati ottenuti dalle varie simulazioni numeriche consentono di definire in maniera verosimile gli scenari idrodinamici in atto nella spiaggia del Poetto, innescati dal moto ondoso. Le simulazioni mostrano chiaramente un regime idrodinamico caratterizzato dalla presenza di una corrente litoranea rivolta da ovest verso est con la formazione di una cella idrodinamica nel lato orientale del Poetto (Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58). I valori di corrente riscontrati, anche in presenza di moto ondoso di una certa intensità, sono sempre inferiori a 1 m/s. La corrente che trova origine dal lato occidentale della spiaggia ne incontra un'altra di senso opposto all'altezza della zona denominata "campeggio" (vedi Figura 16). Ciò è in buon accordo con le osservazioni a disposizione. Il trasporto litoraneo di sedimento associato risulta di una certa intensità nella parte iniziale e centrale della linea di costa per arrivare a valori minimi in corrispondenza della spiaggia di Quartu, e fino al quasi annullamento in corrispondenza della cuspidi in zona "campeggio".

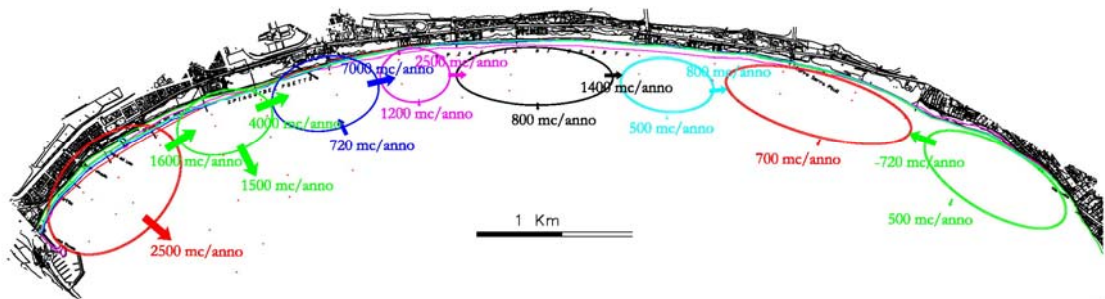


Figura 53: raffigurazione schematica della stima volumetrica del trasporto litoraneo associato al moto ondoso compiuto dal Modello DELFT3D. Le ellissi rappresentano le celle imposte dal modello entro le quali è stato possibile calcolare l'ammontare del trasporto totale.

Pur rappresentando soddisfacentemente le tendenze connesse al trasporto litoraneo, i valori assoluti del trasporto stimati sono distanti da quelli indicati in letteratura e da quelli stabiliti con l'applicazione del modello ad una linea con un rapporto stimabile di 1÷6. La sottostima del trasporto annuo è un fenomeno noto in letteratura, ove si citano normalmente fattori superiori a 5 per la stima del rateo medio di trasporto (Soulsby, 1997). Tale circostanza è facilmente spiegabile dalla complessità del fenomeno modellato. E' importante sottolineare la corretta individuazione delle linee

tendenziali di evoluzione del litorale, anche se non accompagnate da una altrettanto precisa stima dei volumi in gioco.

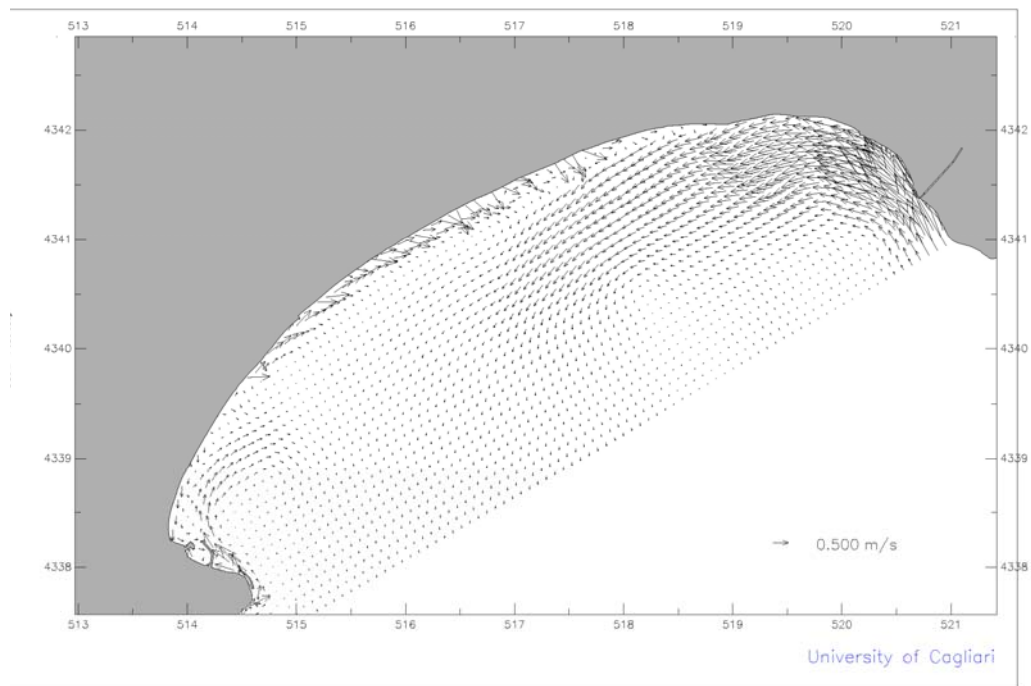


Figura 54: restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 150°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=1.47$ ,  $T_p=5.0$  s,  $Dir=150^\circ N$

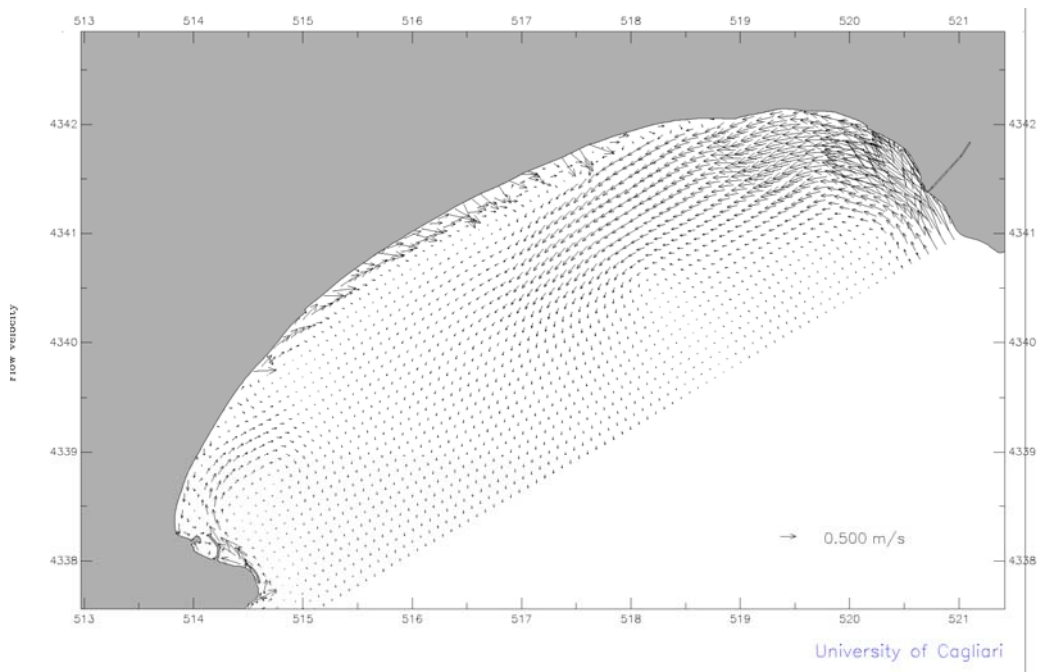


Figura 55: restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 150°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=1.89$ ,  $T_p=5.7$  s,  $Dir=151^\circ N$

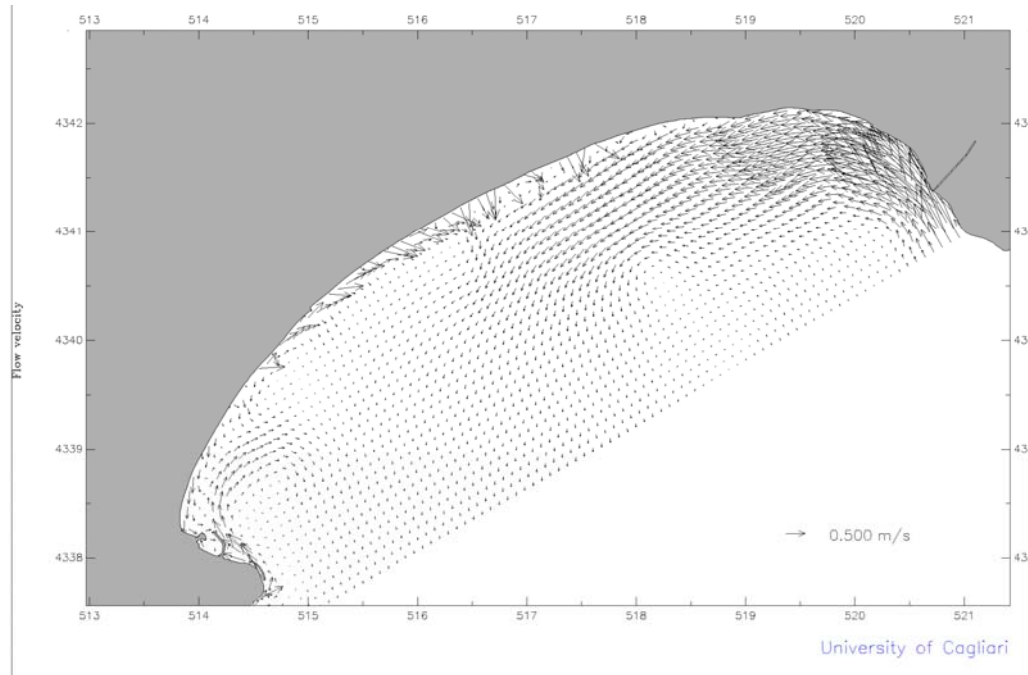


Figura 56: restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 150°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=1.80$ ,  $T_p=5.6$  s,  $Dir=146^\circ N$

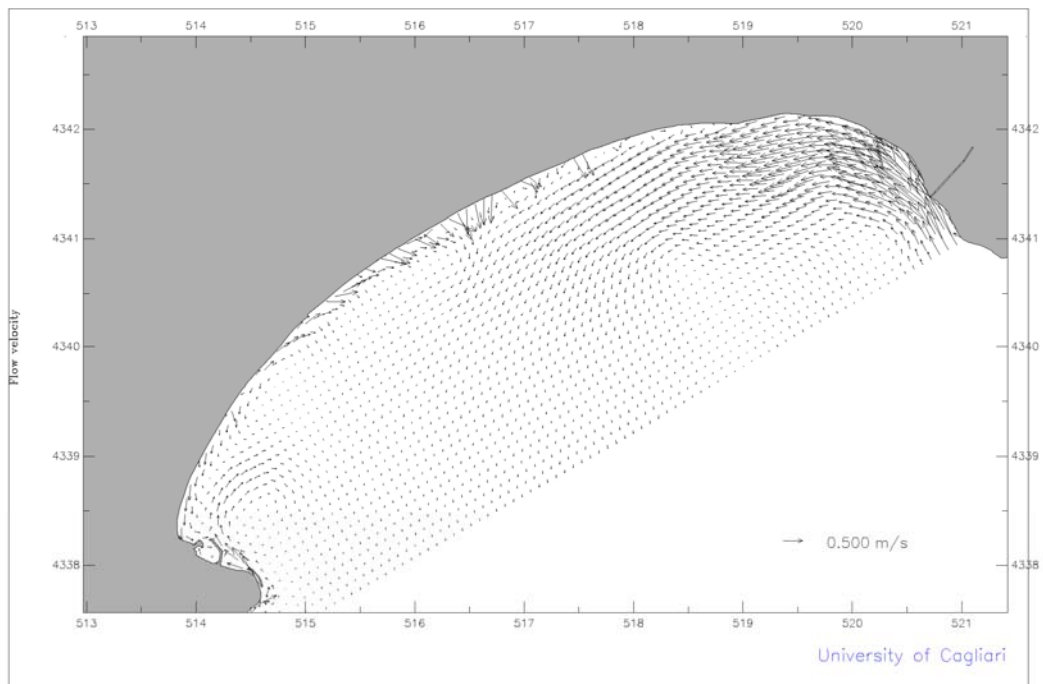


Figura 57: restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 150°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=0.82$ ,  $T_p=3.8$  s,  $Dir=148^\circ N$

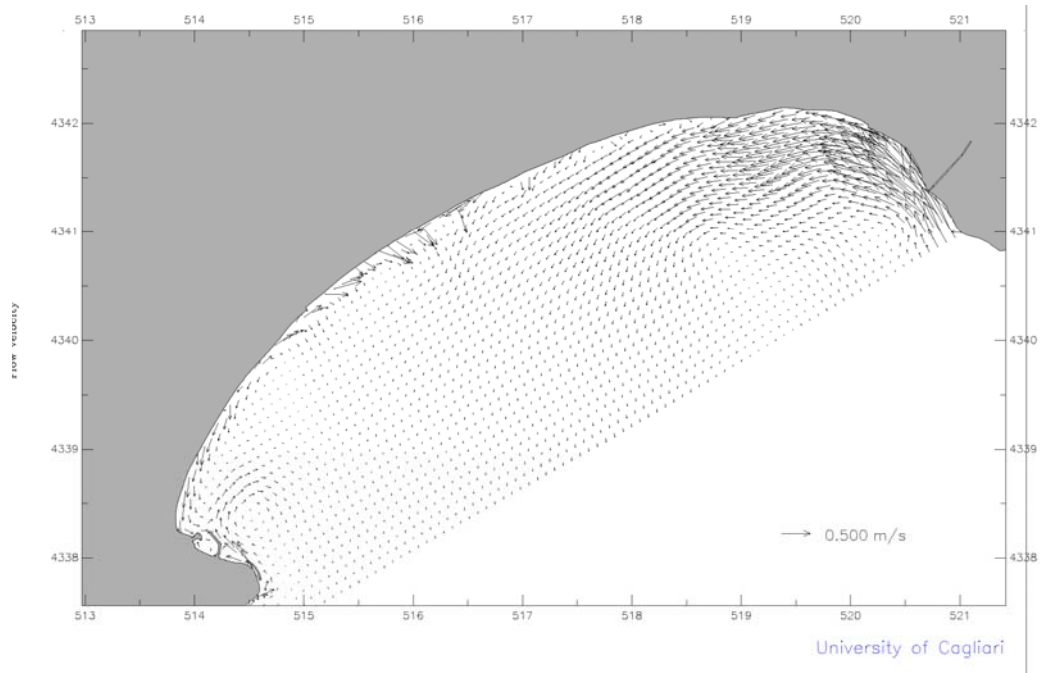


Figura 58: restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 150°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=1.37$ ,  $T_p=4.9$  s,  $Dir=148^\circ N$

## **4 CONCLUSIONI**

Il recente intervento di ripascimento della spiaggia del Poetto, eseguito dalla Provincia di Cagliari, è stato preceduto e seguito da diverse campagne di misure di monitoraggio per il controllo evolutivo della spiaggia.

Si è così resa disponibile una serie storica di dati registrati di varia natura, che altrimenti sarebbe stato impossibile acquisire non esistendo una rete fissa di monitoraggio.

Il monitoraggio eseguito a cura della Provincia di Cagliari si è concluso nel 2004, a due anni dall'intervento.

A partire dal 2005 ho cominciato una serie di 4 campagne di rilevamento finalizzate all'integrazione dei dati già disponibili, concentrate in particolar modo sulla rilevazione della linea di riva.

Ho inoltre effettuato una campagna di campionamento e prelievo di sedimenti lungo la battigia, i cui risultati sono stati comparati con una precedente campagna di ricerca svolta nel 2003 (Lecca e al., 2003).

Ho così potuto formulare delle ipotesi sulle dinamiche litorali in atto.

I rilievi hanno evidenziato che la linea di costa arretra nella parte occidentale della spiaggia da Marina Piccola all'ospedale Marino, mentre avanza per l'apporto di una parte della sabbia erosa, nel tratto successivo della spiaggia, dall'ospedale Marino fino al Campeggio di Quartu S.E.

Gli studi della Provincia hanno portato a stimare che il quantitativo di sabbia erosa dalla spiaggia di Cagliari nei due anni successivi al ripascimento del 2002 sia dell'ordine dei 110.000 m<sup>3</sup>. Coi miei rilievi ho stimato che circa il 20 % di tale quantitativo (22.000 mc) sia stato depositato lungo la spiaggia di Quartu S.E per effetto della deriva litoranea. La restante parte della sabbia andrebbe pertanto dispersa sul fondale del Golfo per effetto del trasporto trasversale.

I dati dei rilievi eseguiti sono stati poi elaborati con il modello di evoluzione ad una linea UNIBEST, opportunamente calibrato. Il modello ha fornito uno schema evolutivo che ha confermato bene le ipotesi formulate sulla base dei rilievi effettuati ed ha permesso di comprendere meglio le dinamiche in atto.

Il modello è stato calibrato secondo uno schema di *back-analysis*, imponendo i valori estremi di due posizioni della linea di costa rispetto al tempo intercorso fra di esse dopo il ripascimento con materiale di granulometria  $D_{50} = 0.38$  mm.

Secondo tale schema, nella spiaggia di Cagliari la linea di costa continuerà ad arretrare con un rateo annuo medio di 2.5 m fino a raggiungere, fra nove anni, la posizione dove era attestata prima del ripascimento.

Ho quindi simulato lo scenario evolutivo che si sarebbe avuto utilizzando una sabbia di  $D_{50} = 0.20$  mm, per la quale ho ottenuto un rateo medio annuo di 3.8 m e quindi superiore di 1.2 m rispetto al precedente.

Con la granulometria inferiore l'erosione, a meno di sopravvenuti fattori turbativi, dovrebbe riportare la linea di costa alla posizione precedente il ripascimento tra 6 anni e quindi 3 anni prima.

Disponendo di dati batimetrici di elevato dettaglio ottenuti in una campagna di rilievi alla quale ho potuto partecipare, nonché dei dati ondametrici della Provincia, ho potuto applicare anche il modello morfodinamico DELFT3D. Per la parte idrodinamica, i risultati ottenuti concordano bene con quelli dei rilievi. Per quanto riguarda il trasporto solido costiero, i volumi calcolati dal modello per diversi tratti della costa variano in maniera significativa, da 1 a 10 volte in meno rispetto ai volumi effettivamente stimati.



## **5 SVILUPPI FUTURI**

La corretta stima dei processi evolutivi in atto in un sistema complesso prevede come condizione essenziale la disponibilità di serie storiche di misurazioni complete ed affidabili delle principali grandezze che lo regolano.

La mancanza parziale o totale di alcune di esse può precludere la possibilità di analizzare in modo oggettivo e attendibile le dinamiche in corso nonché di calibrare modelli di simulazione degli scenari futuri

Sarebbe quanto mai opportuno impostare una rete di monitoraggio che rilevi regolarmente l'evolversi dei processi che interessano i litorali.

Si potrà così costituire una banca dati anche per l'impostazione di modelli previsionali che potranno essere continuamente ricalibrati .

Tale rete dovrà inoltre essere costituita anche da correntometri acustici per il rilevamento delle correnti e di trappole di sedimenti a mare ed a terra, strumenti necessari per quantificare in modo attendibile il trasporto solido, marino ed eolico.

## **BIBLIOGRAFIA**

- AA. VV., 2004, Roma. 3° QUADERNO TECNICO, BEACHMED;
- ALLEN, J.R.L., 1980. Sand waves: A model of origin and internal structure. *Sediment. Geol.* 26, 281-328;
- AMINTI P. PRANZINI E., 1993. L'erosione e la difesa dei litorali. La difesa dei litorali in Italia, 34, 9 – 10, Edizioni delle Autonomie;
- AMINTI P. PRANZINI E., 1999. Studi costieri. *Studi Costieri*, 1, 1 – 2. Atti del convegno: La difesa dei litorali nel rispetto ambientale, Pisa, 24 – 26 Ottobre 1997;
- AMINTI P., CAPPIETTI L. 2001. Interventi di riequilibrio di un tratto di costa difeso con opera a scogliera, *Giornate di Ingegneria Costiera – Atti*;
- AMOS, C.L., BOWEN, A.J., HUNTLEY, D.A., LEWIS, C.F.M., 1988. Ripple generation under the combined influences of waves and currents on the Canadian continental shelf. *Cont. Shelf Res.* 8, 1129–1153;
- ANTONIOLI F, S. SILENZI, E. VITTORI AND C. VILLANI, 1999. Sea Level Changes and Tectonic Mobility: Precise Measurements in Three Coastlines of Italy Considered Stable During the Last 125 ky - *Phys. Chem. Earth (A)*, Vol. 24. No. 4, pp. 337-342 – Q 1999 Elsevier Science Ltd;
- ANZIDEI M. BALDI P., FABRIS M., 2007. Integrazione di dati fotogrammetrici. LIDAR, e batimetrici nell'arcipelago delle isole Eolie, *Bollettino SIFET società italiana di fotogrammetria e topografia – n1*;
- APAT, 2004. Atlante Delle Onde Nei Mari Italiani;
- ATZENI A., 2003. Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna, *Studi Costieri*;
- ATZENI A., GINESU S., 1993. Evoluzione dei litorali della Sardegna e interventi di riequilibrio. La difesa dei litorali in Italia, 34, 215 – 231, Edizioni delle Autonomie;
- ATZENI A., S. DE MURO, F. DI GREGORIO,G. PIRAS, 2004. Carta del Rischio Geo – Ambientale nelle Coste della Sardegna;
- ATZENI A., 2003. Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna, *Studi Costieri*: 61-80;
- BACELLE L. & BOSELLINI A., 1965. Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie. *Annali Univ. Ferrara*, sez. IX, vol. 16, 19-40
- BALZANO A.,CAPPIETTI L., SOLDINI L., ZANUTTIGH B., 2005. Modellazione Numerica della circolazione attorno ad opere tra cimabili, *Studi Costieri - 9* 119-157;
- BARROCU G., CREPELLANI T., LOI A., 1981. Caratteristiche geologico - tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari (con allegata carta geologico-tecnica in scala 1:10.000). “*Riv. Ital. di Geotecnica*”, XV, 2, pp. 98-144, Napoli;
- BATTJES, J.A. AND STIVE M.J.F., 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *J. Geophys. Res.*, 90, No. C5, 9159-9167;
- BENASSAI E.ed al., 2001. Un esempio di analisi di affidabilità di un rinascimento artificiale, *Giornate di Ingegneria Costiera – Atti*;
- BERRY ELFRINK, 2002. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives, *Coastal Engineering* 45;

- BERTOTTI, L AND L. CAVALERI, 1994. Accuracy of wind and wave evaluation in coastal regions, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 57-67;
- BEZZI A. FONTOLAN G., Ravenna 7-11 October 2003. Fore-dune classification and Morphodynamic processes along the Veneto Coast, Proceedings 6th Internationale Conference on the Mediterranean Coastal Environment;
- BIAGI L., CRESPI M., MANZINO A., SANSONO F., 2006. I servizi di posizionamento basati su reti di stazioni permanenti GNSS, Bollettino SIFET società italiana di fotogrammetria e topografia-n.1;
- BOOIJ N., RIS R. C., HOLTHUIJSEN L. H., 15 Aprile 1999. A third-generation wave model for coastal regions – model Description and Validation, Journal of Geophysical research, vol. 104, NO. C4, pages 7649-7666;
- BREMAN, 2002. Marine Geography – ESRI, Redlands, California, USA;
- BRIGANTI R., CONTINI P., FRANCO L., NUNZIATI A., MILANA G., FRANCO L., Modimar, 2004. Rapporto n.3. Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondometrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica;
- BURCHART H.F, HAWKINS S.J, ZANUTTIGH B., LAMBERTI A., 2007. Environmental design guidelines for low crested coastal structures, Elsevier;
- CAMENEN B., LARROUDÈ P., 2003. Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment, Coastal Engineering 48;
- CASTILLO C. , R. MINGUEZ , E. CASTILLO , M.A. LOSADA, 2006. An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters, Coastal Engineering 53 1 – 25;
- CASULA G., SERPELLONI E., GIOVANI L., 2006. Linee guida per la programmazione remota e lo scarico di ricevitori GPS (Standard Trimble NAVIGATION Limited – Serie 5000), Rapporti Tecnici INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 31;
- CLAY, C. S., AND MEDWIN, H., 1977. Acoustical Oceanography. Wiley, New York. 544 pp;
- CLIFTON, H.E., 1976. Wave-formed sedimentary structures — a conceptual model. In: Davis, A.R. Jr., Ethington, R.L. (Eds.), Beach and Nearshore Sedimentation. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. 24, 126–148;
- CUR, 1987. Manual on artificial nourishment – rijkswaterstaat, Delft hydraulics;
- DE BEUKELAER S. M., I. R. Macdonald, N. L. GUINASSO Jr, J. A. MURRAY, 2003. Distinct side-scan sonar, RADARSAT SAR, and acoustic profiler signatures of gas and oil seeps on the Gulf of Mexico slope, Geo-Mar Lett 23: 177–186;
- DE MURO S, BRAMBATI, DI GRANDE A., 2004. Atlante delle Coste dello stretto di magellano orientale Patagonia e terra del fuoco, 32nd International Geological Congress;
- DEAN, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and gulf coasts. Univ. Delaware, Ocean Eng., Rep. No. 12;
- DELAN DUNNE, 2006. 3D- web mapping, Hydro International 9;
- DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2000. SWAN Cycle III version 40.11 User Manual (not the short version);

- DENNIS ANTHONY, JÜRGEN O. LETH, 2002. Large-scale bedforms, sediment distribution and sand mobility in the eastern North Sea of the Danish west coast, *Marine Geology* 182 247-263;
- DINGLER, J.R., INMAN, D.L., 1976. Wave-formed ripples in nearshore sands. In: Proc. 15th Coastal Engineering Conf., ASCE, New York, pp. 2109–2126;
- ECKART C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 256, 225-240.
- EVELYN BROWN ed all., 1999. *Waves, Tides And Shallow Water Processes*, Butterworth Heinemann, Oxford (UK) – Singapore;
- FERRETTI O., DELBONO I., FURIA S., BARSANTI M., 2003 Elementi di gestione costiera. Parte Prima. Tipi morfo - sedimentologici dei litorali italiani. Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/42/CLIM;
- FERRETTI O., DELBONO I., FURIA S., BARSANTI M., 2003 Elementi di gestione costiera. Parte Seconda. Erosione costiera. Lo stato dei litorali italiani. Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/43/CLIM;
- FERRETTI O., DELBONO I., FURIA S., BARSANTI M., BOZZANO A., 2003 Elementi di gestione costiera. Parte Terza. Difese costiere rigide. Distribuzione e valutazione delle tipologie. Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/44/CLIM;
- FERRETTI O., DELBONO I., FURIA S., BARSANTI M., 2003. Elementi di gestione costiera. Parte Quarta. Difese costiere morbide: ripascimenti artificiali. Rassegna tipologica.. *Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/45/CLIM*;
- FRANCO L., CONTINI P., MILANA G., SALTARI D, 1999. Studio della evoluzione della spiaggia con modello ad una linea, Progetto di Salvaguardia del Litorale del Poetto;
- FREDSOE, J., DEIGAARD, R., 1992. *Mechanics of coastal sediment transport*, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.3. World Scientific, Singapore;
- GALLAGHER, E.L., ELGAR, S., AND THORNTON, E.B., 1998. Megaripple migration in a natural surf zone. *Nature*, 394, 165-168;
- GALLAGHER E. L., 2003. A note on megaripples in the surf zone: evidence for their relation to steady flow dunes, *Marine Geology* 193 171-176;
- GUERRICCHIO A., 1987. *L'evoluzione di Litorali*, BIOS;
- HAKEEM K. JOHNSON, 2006. Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters, *Coastal Engineering* 53 39 – 48;
- HAY, A.E. AND D.J. WILSON, 1994. Rotary side scan images of nearshore bedform evolution during a storm, *Marine Geology*, 119, 57-65;
- HARE R., 2004. Multi-beam Error Management, *Hydro International* 8;
- HERBICH JOHN B., 1999. *Handbook Of Coastal Engineering*, McGraw Hill;
- HOLTHUIJSEN, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993. A spectral wave model for the coastal zone, Proc. of 2nd Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, 630-641;
- HOLTHUIJSEN, L.H., N. Booij, R.C. Ris, IJ. G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftenburg, R. Padilla-Hernandez, 1999. SWAN, User manual (not the short version), SWAN Cycle 2, version 40.01;
- HOLTHUIJSEN ed al., 2003. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models, *Coast. Eng.*, 49, 291-305;
- HYDRO, 2002;

- INMAN D.L., 1952. Measures for describing the size distribution of sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 22, 125-145;
- JAVIER L. LARA, 2005. A numerical wave flume to study the functionality and stability of coastal structures, *On course PIANC Magazine* – 121;
- KEVIN WHITE ed al., 2002. Changes in Coastal sediment transport processes due to construction of New Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt, *Coastal Engineering* 46;
- KINDLER P., E. DAVAUD , A. STRASSER, 1997. Tyrrhenian coastal deposits from Sardinia (Italy): a petrographic record of high sea levels and shifting climate belts during the last interglacial (isotopic substage 5e), *Palaeogeography, Palaeoclimatology. Palaeoecology* 133 1-25;
- KOMAR PAUL D., 1998. *Beach Processes And Sedimentation* –2nd ed., Prentice Hall – Upper Saddle River, New Jersey;
- KOMAR, P.D., MILLER, M.C., 1974. Sediment threshold under oscillatory waves. *Proc. 14th Conf. Coastal Engineering, ASCE, Copenhagen*, pp. 756–775;
- KOMAR, P.D., MILLER, M.C., 1975. The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stresses under waves. *J. Sediment. Petrol.* 45, 697–703;
- KUMAR V. S., 2003. Longshore sediment transport rate, measurement and estimation, central west coast of India, *Coastal Engineering* 48;
- KURT LAMBECKA, YUSUKE YOKOYAMAB, TONY PURCELLA, 2002. Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during - Oxygen Isotope Stages 3 and 2, *Quaternary Science Reviews* 21 343–360;
- I.I.M. Istituto Idrografico della Marina, 1980. *Il vento e lo stato del mare lungo le coste italiane e dell’adriatico*;
- LECCA L., DE MURO S. COSSELLU M. & PAU M., 2005. I sedimenti Terrigeno-Carbonatici attuali della piattaforma continentale del golfo di Cagliari, *IL Quaternario* 18(2), 201-221;
- Leendertse, J.J., 1967. Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation. Ph. D. Thesis, RM-5294-RR, Rand Corporation, Santa Monica.
- Leendertse, J.J. and E.C. Gritton, 1971. A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas: Vol. II, *Computation Procedures*, Report R-708-NYC, The Rand Corporation (Santa Monica).
- LEENDERTSE, J.J., R.C. Alexander and S-K. Liu, 1973. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas, The Rand Corporation (Santa Monica):
- LEENDERTSE, J.J., 1987. A three-dimensional alternating direction implicit model with iterative Fourth order dissipative non-linear advection terms. WD-3333-NETH, The Netherlands Rijkswaterstaat.
- LEENDERTSE, J.J., 1989. A new approach to three-dimensional free-surface flow modelling, R-3712-NETH/RC, The Rand Corporation (Santa Monica).
- LEENDERTSE, J.J., 1990. Turbulence modelling of surface water flow and transport: part IVa. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 114, No. 4, 603-606.
- LI MICHAEL Z. ,AMOS CARL L., 1999. Field observations of bedforms and sediment transport thresholds of fine sand under combined waves and currents, *Marine Geology* 158 147–160;

- LIBERATORE G., 1993. L'uso di barriere sommerse per la protezione si ripascimenti artificiali: un esempio di realizzazione nel Veneto orientale. La difesa dei litorali in Italia, 34, 253 - 267, Edizioni delle Autonomie;
- LONGHITANO S., 2005. Appunti Corso Dinamica costiera, <http://www.unibas.it/utenti/longhitano/Downloads.htm>;
- Manuale di Ingegneria Civile, 1996. Volume primo – terza edizione, Zanichelli/Esac, Bologna;
- MATTHIAS BLECK, 2006. Wave attenuation by artificial reefs, On course PIANC Magazine – 125;
- MELVIN GARY D., NORMAN A. COCHRANE, AND YANCHAO Li, 2003. Extraction and comparison of acoustic backscatter from a calibrated multi- and single-beam sonar, ICES Journal of Marine Science, 60: 669–677;
- MILES J.R. ed al., 2002. Field observations of the effect of shear waves on sediment suspension and transport, Continental Shelf Research 22;
- MILLI M., SURACE L., 2006. Tecniche innovative e tradizionali a confronto nella realizzazione di rilievi batimetrici costieri: un caso di studio, Bollettino SIFET società italiana di fotogrammetria e topografia – n.2;
- MORELISSSEN R., HULSCHER S. J.M.H., KNAAPEN M. A.F, NEMETH A.A., BIJKER R., 2003. Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines, Coastal Engineering 48 197–209;
- NUNZIATI A., MILANA G., FRANCO L., -MODIMAR, 2004. Rapporto n.1. Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondametrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica;
- NICKLING W.G., 1994. Aeolina sediment transport and Deposition. Blackwell Sci. Pub;
- ORUX P.ed al., 2002. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters, JComputers & Geosciences;
- PAIPAI ELENI, 2003. Beneficial Uses of Dredged material: Yesterday, Today and Tomorrow, TERRA et AQUA 92;
- PELNARD-CONSIDÈRE, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des fortlles de rivages en plages de sable et de galets. IVem Journées de l'Hydraulique Question III, Raport 1 74-1, 74-10;
- PRACCHI R., 1980. Atlante della Sardegna, Kappa;
- PROGEMISA, 2006. Indagine conoscitiva preliminare per un progetto di salvaguardia e ripristino del litorale del Poetto – evoluzione storica della linea di costa, sito internet istituzionale R.A.S.;
- RESTA F., a.a.1998-1999. Appunti di topografia;
- RHODES M., 2006. Underwater Electromagnetic Propagation, Hydro International 10;
- RIS C., L. H. HOLTHUIJSEN, N. BOOIJ, 15 Aprile 1999. A third-generation wave model for coastal regions – Verification, Journal of Geophysical research, vol. 104, NO. C4, pages 7649-7666;
- RIS, R.C., 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas, Ph.D.-dissertation, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands;
- RIS, R.C., N. Booiij and L.H. Holthuijsen, 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, J. Geophys. Res., 104, C4, 7649-7666;

- RITOSSA F., 2004. Evoluzione della spiaggia sommersa del Poetto di Cagliari (Sardegna meridionale). Validazione di un modello numerico di trasporto sulla base di rilievi batimetrici con sonar tipo multibeam. Tesi di dottorato inedita;
- ROB GARDINER, 2006. Surf Zone Ground Investigation Using ROV, mounted CPT, Hydro International 4;
- RANASINGHE R., TURNER I.L., 2006. Shoreline response to submerged structures: A review, Coastal Engineering 53 65 – 79;
- SECCHIA M.,GPS; 2005. Guida all'uso del GPS per il rilevamento del territorio e l'aggiornamento cartografico, ASSOGEO – TRIMBLE, Maggioli editore;
- SEGRE A.G., 1969. Linee di riva sommerse e morfologia della piattaforma continentale italiana relative alla trasgressione marina versiliana, *Quaternaria*, 6;
- SHORE PROTECTION MANUAL - ed. 1977/1984, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Kingman Building, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A.;
- SIMM J.D., BRAMPTON A.H., BEECH N. W., BROOKE J.S., 2001. Beach management manual , CIRIA – UK;
- SOULSBY ,KIKEGAARD,VAN Os, 2004. The future Role of experimental methods in European hydraulic research, Bulletin 117, PIANC;
- SOULSBY R., 1997. Dynamics Of Marine Sands, Thomas Telford Services Ltd, London;
- SPAANS J., 2006. Global Navigation Satellite System, Hydro International 7;
- SPANO B., PINNA M., 1956. Le spiagge della Sardegna, CNR;
- SPIEGEL M., 1994. Statistica, McGraw Hill;
- STIVE, M.J .F. AND J .A. BATTJES, 1984. A model for offshore sediment transport. *Proc. of19th Intern. Conference on Coastal Engineering*, pp. 1420-1436, American Society of Civil Engineers, New York;
- SWANSON R.G., 1985. Sample Examination Manual, AAPG, 35 pp;
- TERRILE E. , RENIERS J.H.M. , STIVE M. J.F., TROMP A M., VERHAGEN H.J., 2006. Incipient motion of coarse particles under regular shoaling waves, Coastal Engineering 53 81 – 92;
- THOMAS M. LILLESAND, RALPH W. KIEFER, 2000. Remote Sensing And Image Interpretation, John Wiley & sons, Inc – USA;
- THORNTON, E.B., SWAYNE J.L. AND DINGLER J.R., 1998. Small-scale morphology related to waves and currents across the surf zone, Marine Geology, 145, 173-196;
- TOMASICCHIO G.R., 2006. Capabilities and limits for ADV measurements of breaking waves and bores, Coastal Engineering 53 27 – 37;
- TOMASICCHIO U., 1998. Manuale Di Ingegneria Portuale e Costiera, BIOS – Cosenza;
- URICK, R. J., 1983. Principles of Underwater Sound, 3rd edition. McGraw-Hill, New York. 423 pp;
- VALDEMORO H. ed al., 2007. Coastal Dunefield Evolution in Conditions of Limited Sediment Availability: Natural and Anthropogenic Controls on the Corralejo Dunes Conference Proceeding Paper of Costal Sediments;
- VAN DER WERF J., 2006. Seabed in motion, Hydro International 8;
- VAN RIJN L.C., 1998. Principles of Coastal Morphology. Aqua Publicaions, Utrecht;

- VAN RIJN, L.C., NIEUWJAAR, M.W.C., VAN DER KAAJ, T., NAP, E., VAN KAMPEN, A., 1993. Transport of fine sands by currents and waves. *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng.* ASCE 119 (2), 123–143;
- VAN THIEL DE VRIES et al., 2007. Interaction of Dune Face and Swash Zone, Conference Proceeding Paper of Coastal Sediments;
- VELLINGA, P., 1986. Beach and dune erosion during storm surges. PhD thesis, Delft Univ. of Technology, also Delft Hydraul. Publ., No. 372;
- VINCENT, C.E., HANES, D.M., BOWEN, A.J., 1991. Acoustic measurements of suspended sand on the shoreface and the control of concentration by bed roughness. *Mar. Geol.* 96, 1–18;
- WENTWORTH C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 30, 377-392;
- WIBERG, P.L., HARRIS, C.K., 1994. Ripple geometry in wave-dominated environments. *J. Geophys. Res.* 99, 775–789;
- WL|DELFT HYDRAULICS, 1992. UNIBEST, A software suite for simulation of sediment transport processes and related morphodynamics of beach profiles and coastline evolution. Model description and validation. delft hydraulics Report H454.14;
- WL | DELFT HYDRAULICS, 2000. Physical formulations swan and data for validation, Report no. H3528, Delft;
- WL | DELFT HYDRAULICS., 2006A. DELFT3D-FLOW USER MANUAL;
- WL | DELFT HYDRAULICS., 2006B. DELFT3D-GPP USER MANUAL;
- WL | DELFT HYDRAULICS., 2006C. DELFT3D-QUICKIN USER MANUAL;
- WL | DELFT HYDRAULICS., 2006c. UNIBEST User Manual.



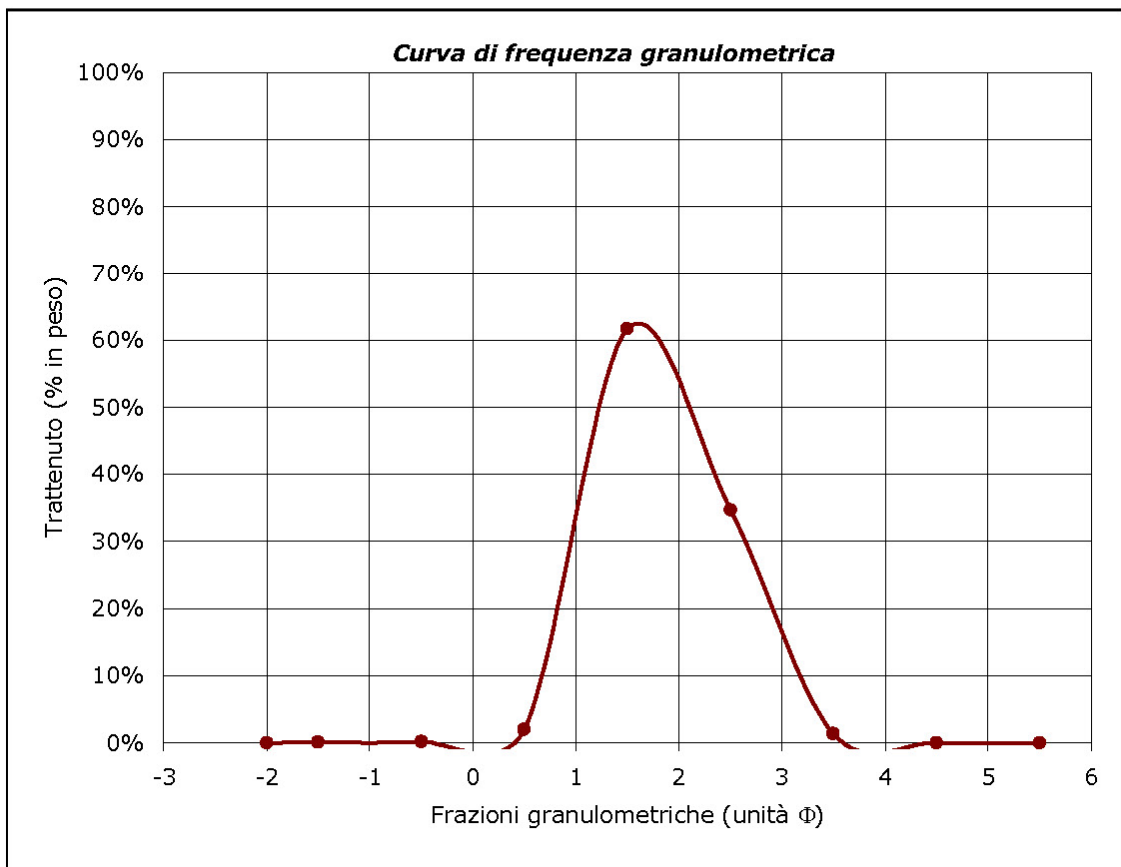
## **ALLEGATI**

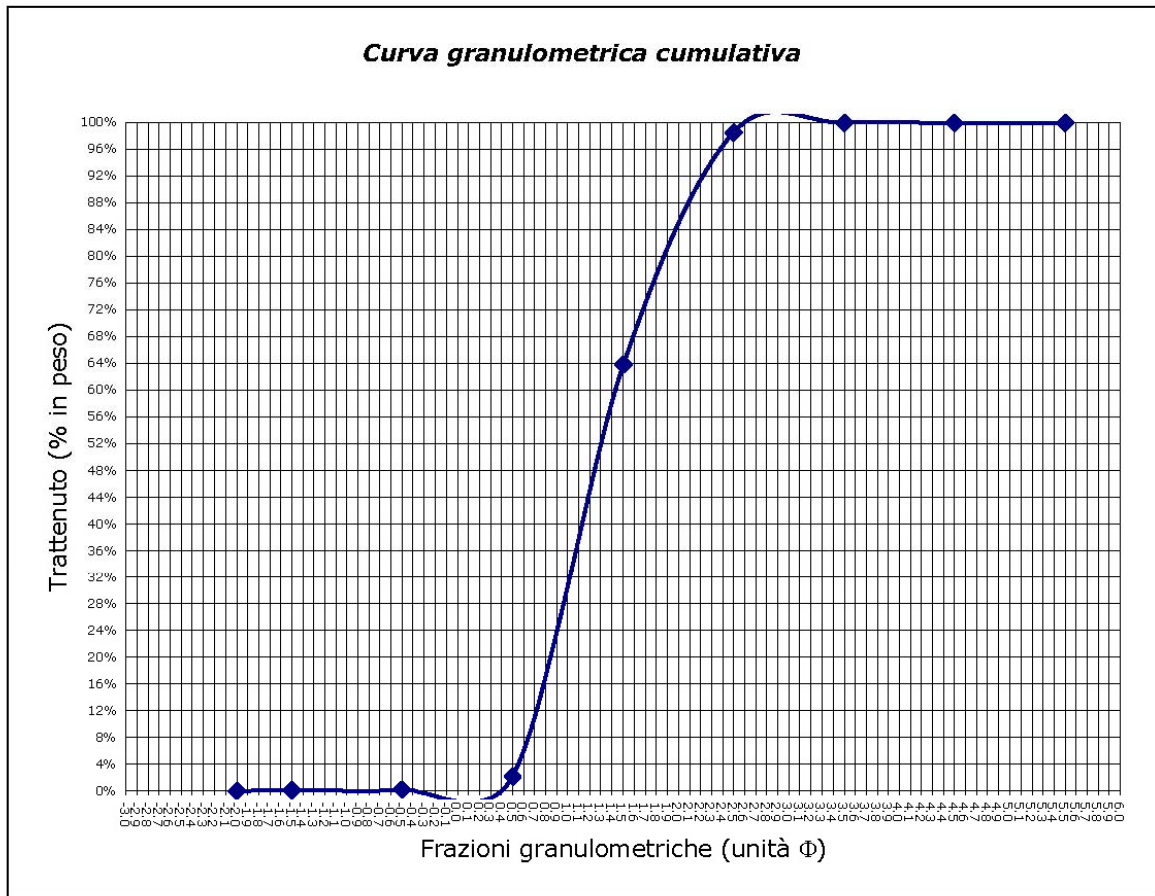
**ANALISI GRANULOMETRICHE E RICONOSCIMENTO  
COMPOSIZIONALE AL MICROSCOPIO BINOCULARE**

<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P01	N 4 338 323,063	battigia	17.06.2007
	E 513 812,443		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	235,27 Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,15	0,06%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,42	0,18%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	4,57	1,94%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	144,98	61,62%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	81,56	34,67%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	3,38	1,44%
Fanghi	< 63	> 4	0,01	0,00%
				99,91%



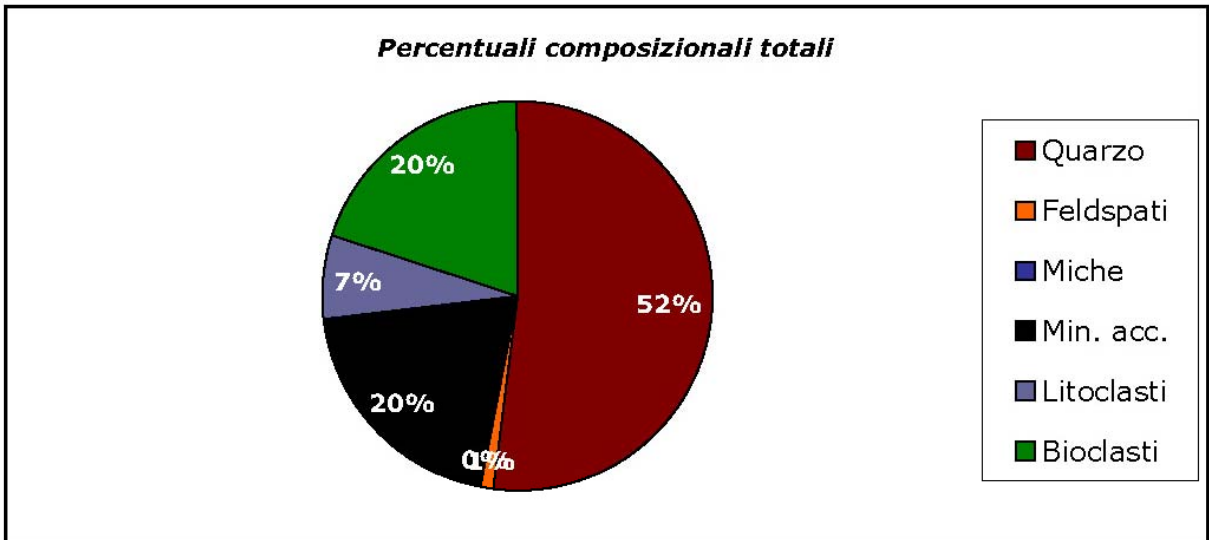


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.60$$

Sedimento discretamente classato

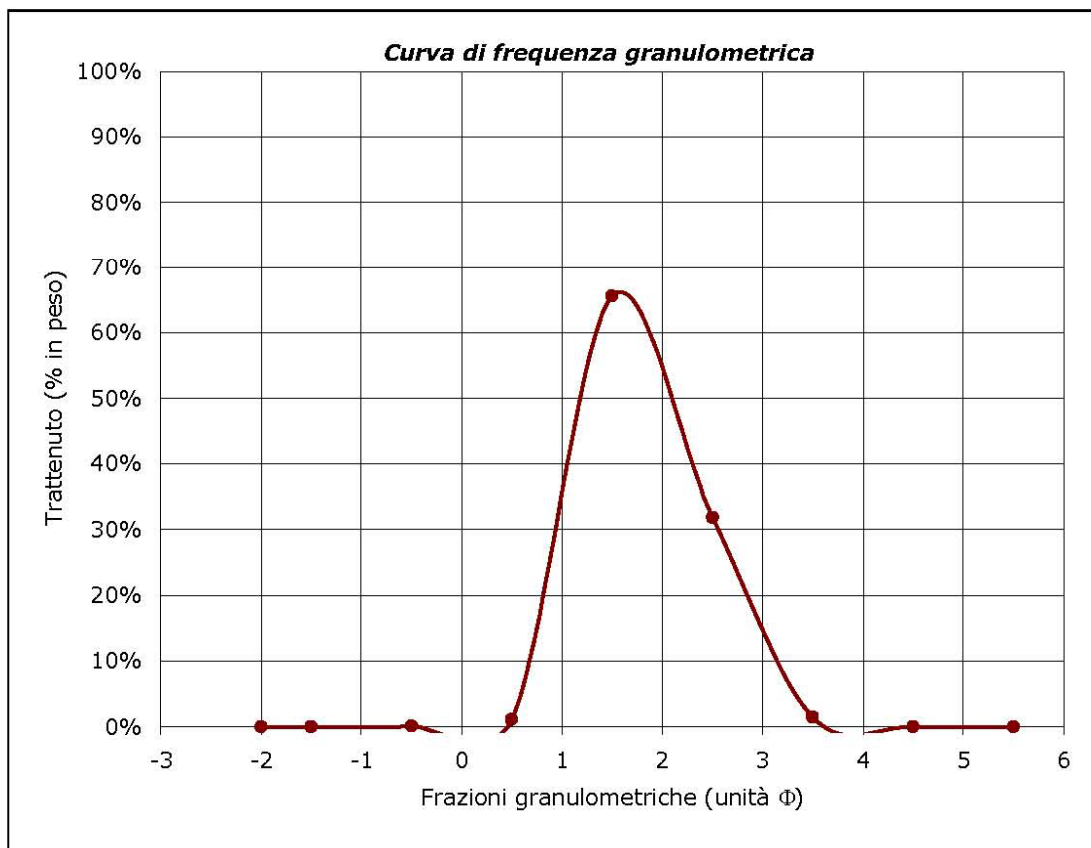
P01		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		52%	1%	0%	20%	7%	20%

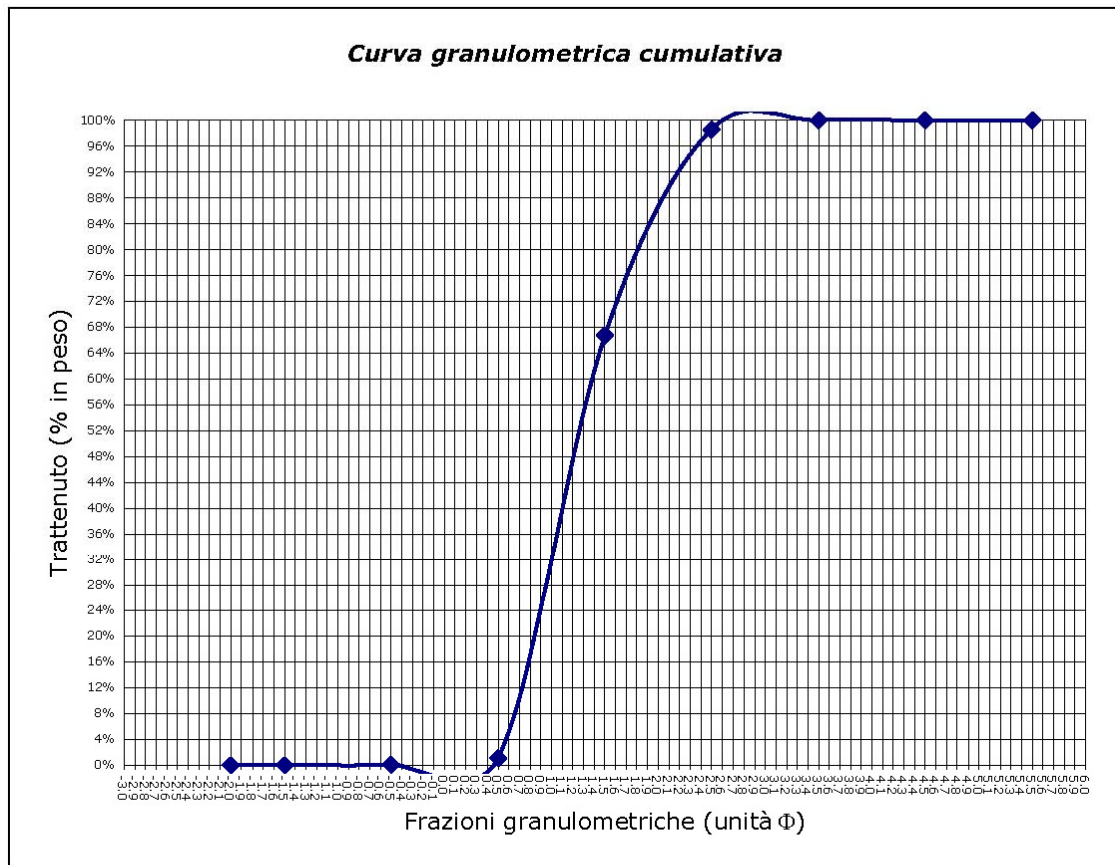


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P02	N 4 338 596,842	battigia	17.06.2007
	E 513 834,987		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	164.23	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0.00	0.00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0.13	0.08%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	1.77	1.08%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	107.66	65.55%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	52.24	31.81%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	2.38	1.45%
Fanghi	< 63	> 4	0.05	0.03%
				100.00%





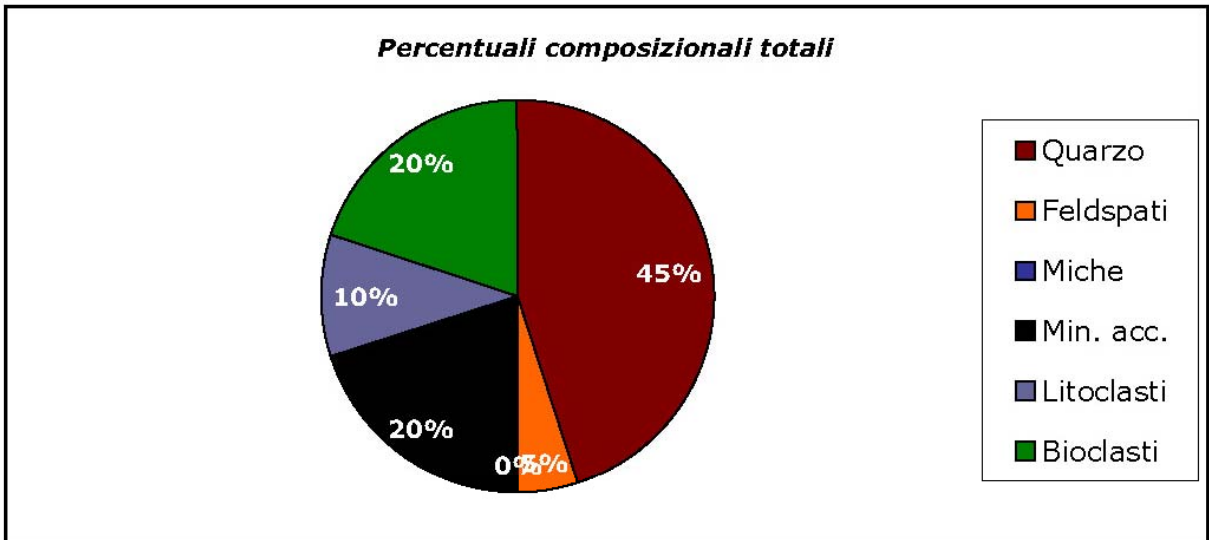
**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.55$$

Sedimento discretamente classato



P02		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		45%	5%	0%	20%	10%	20%

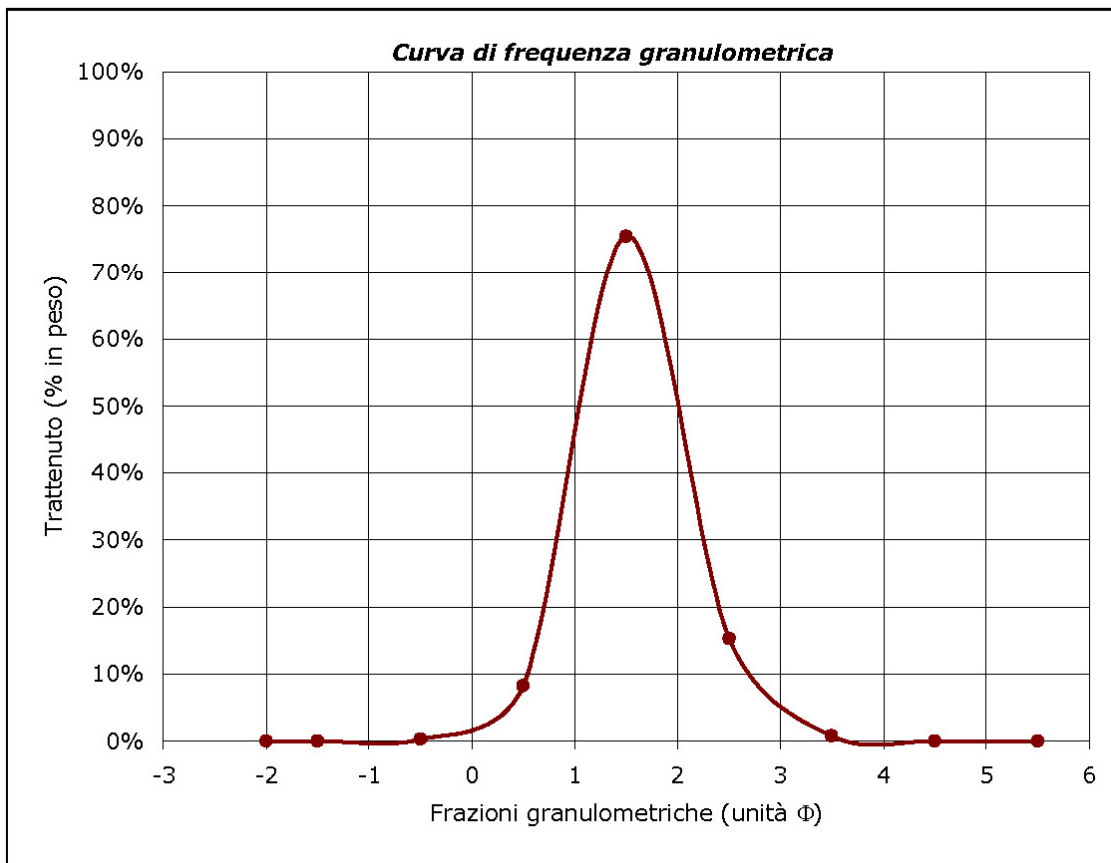


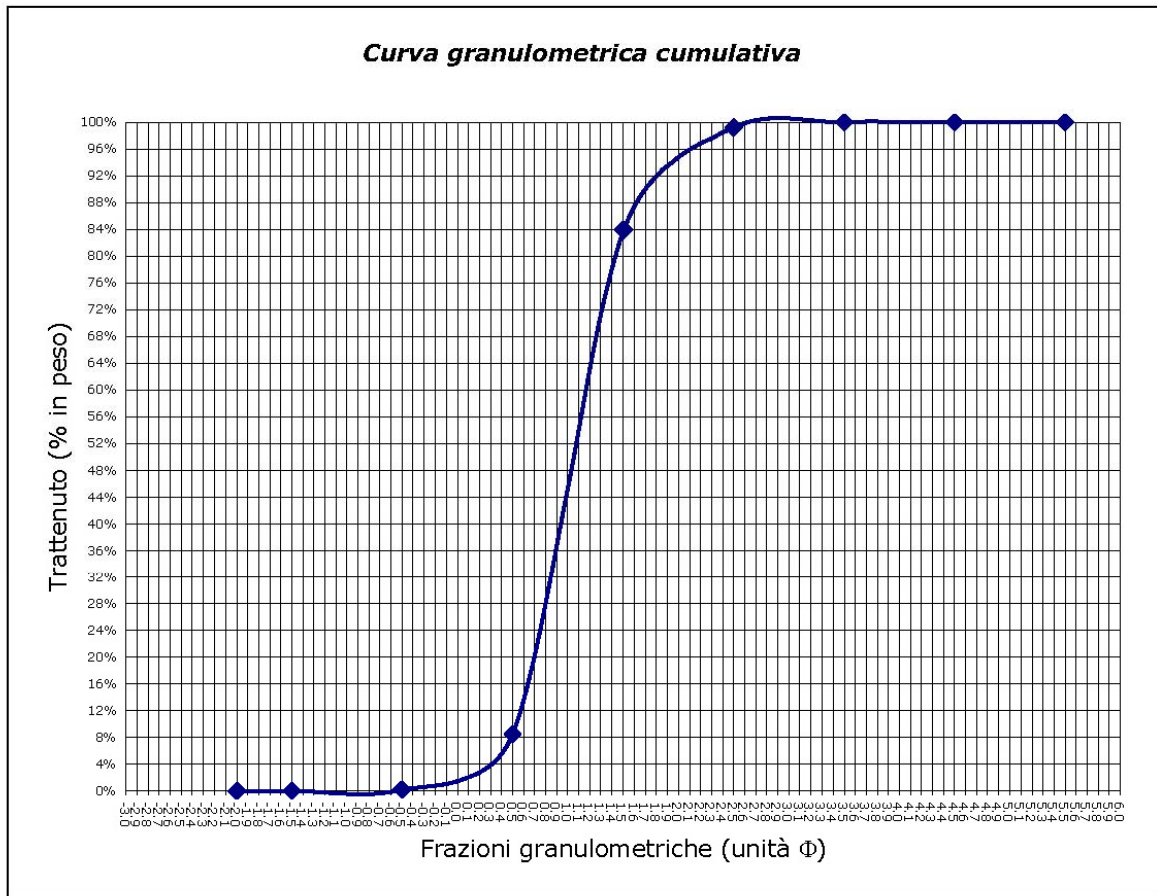


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P03	N 4 339 255,841	battigia	17.06.2007
	E 514 140,347		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	233,37 Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,01	0,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,58	0,25%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	19,29	8,27%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	175,98	75,41%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	35,58	15,25%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	1,90	0,81%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,99%



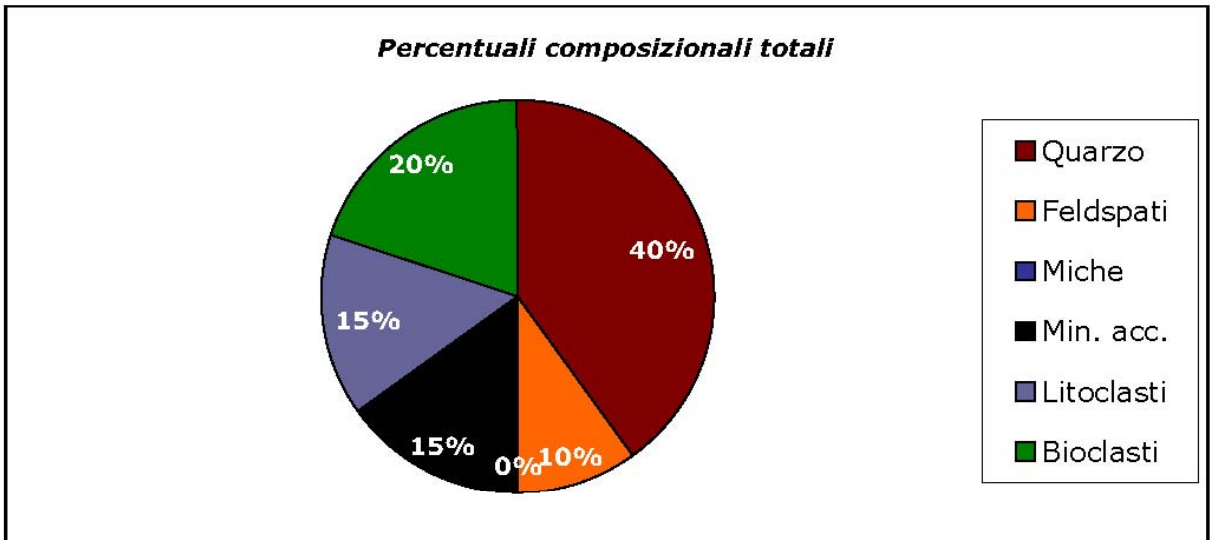


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.48$$

Sedimento ben/discretamente classato

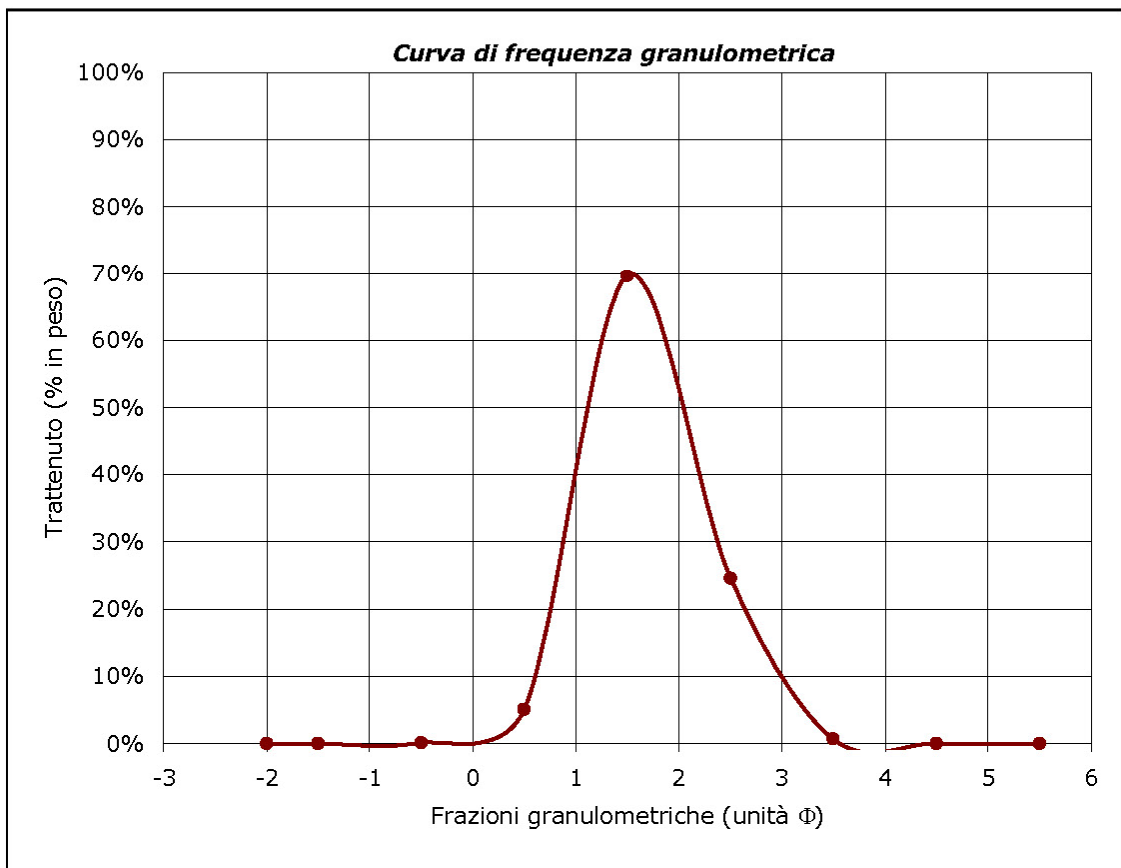
P03		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		40%	10%	0%	15%	15%	20%

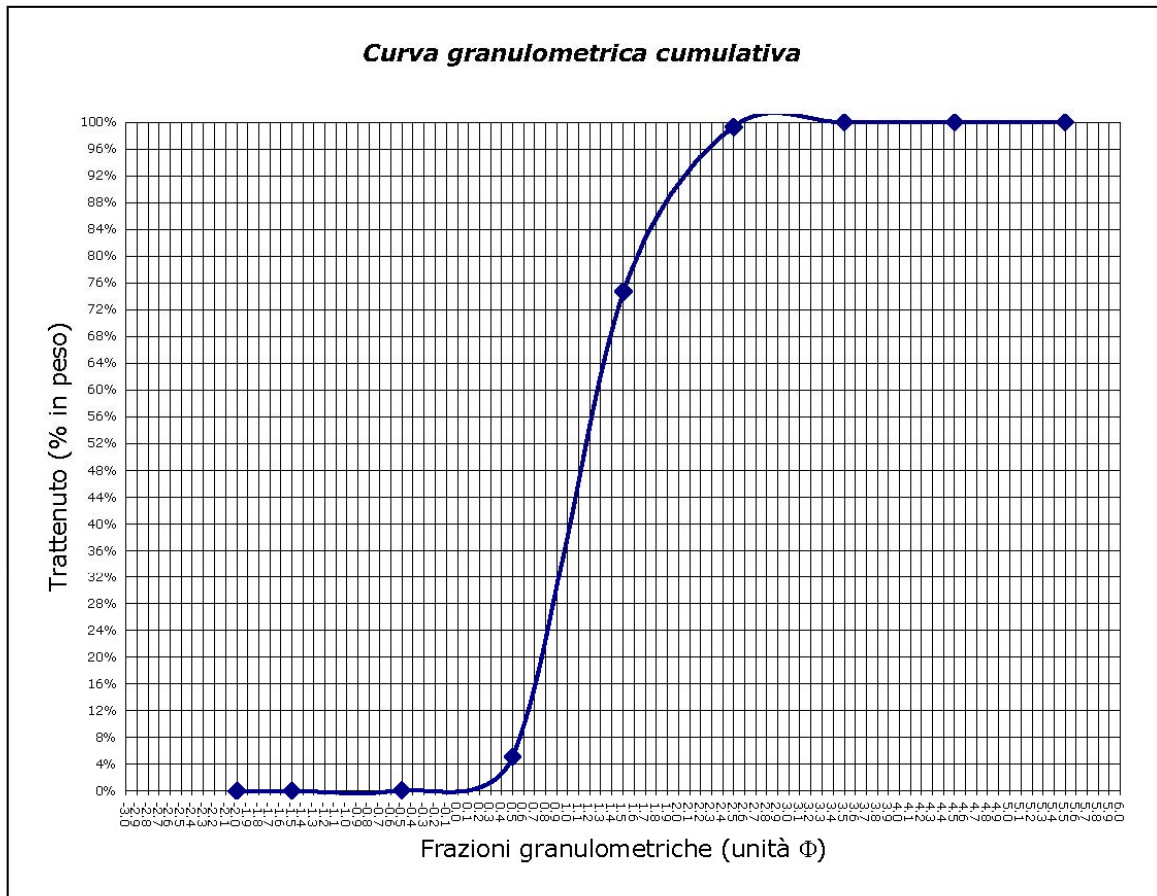


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P04	N 4 339 750,443	battigia	17.06.2007
	E 514 555,321		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	145,74	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,02	0,01%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,13	0,09%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	7,31	5,02%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	101,45	69,61%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	35,84	24,59%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	1,00	0,69%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				100,01%



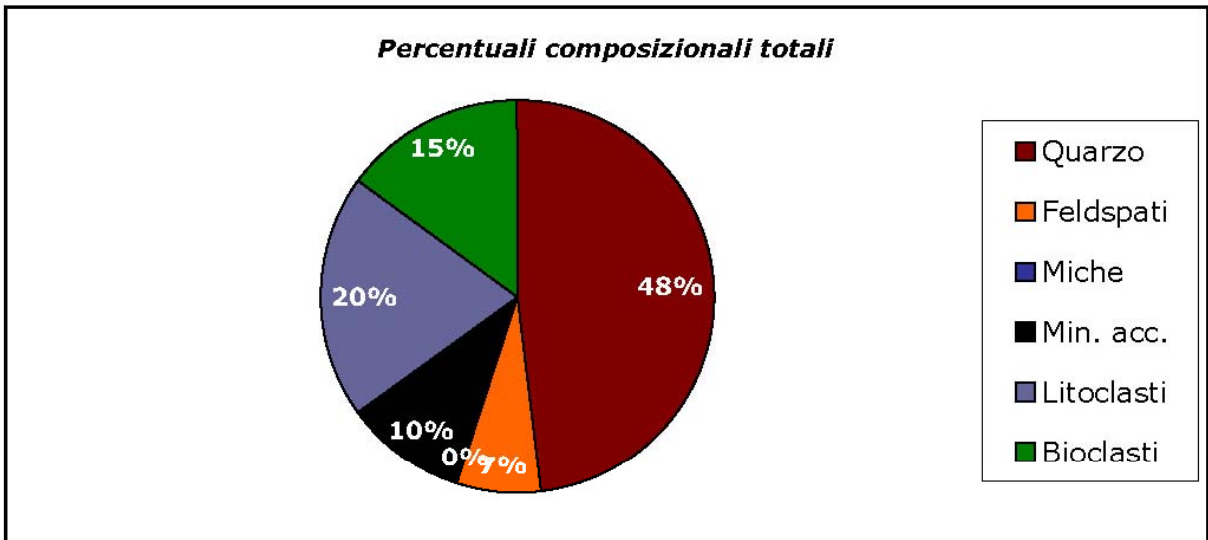


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.53$$

Sedimento discretamente classato

P04		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		48%	7%	0%	10%	20%	15%

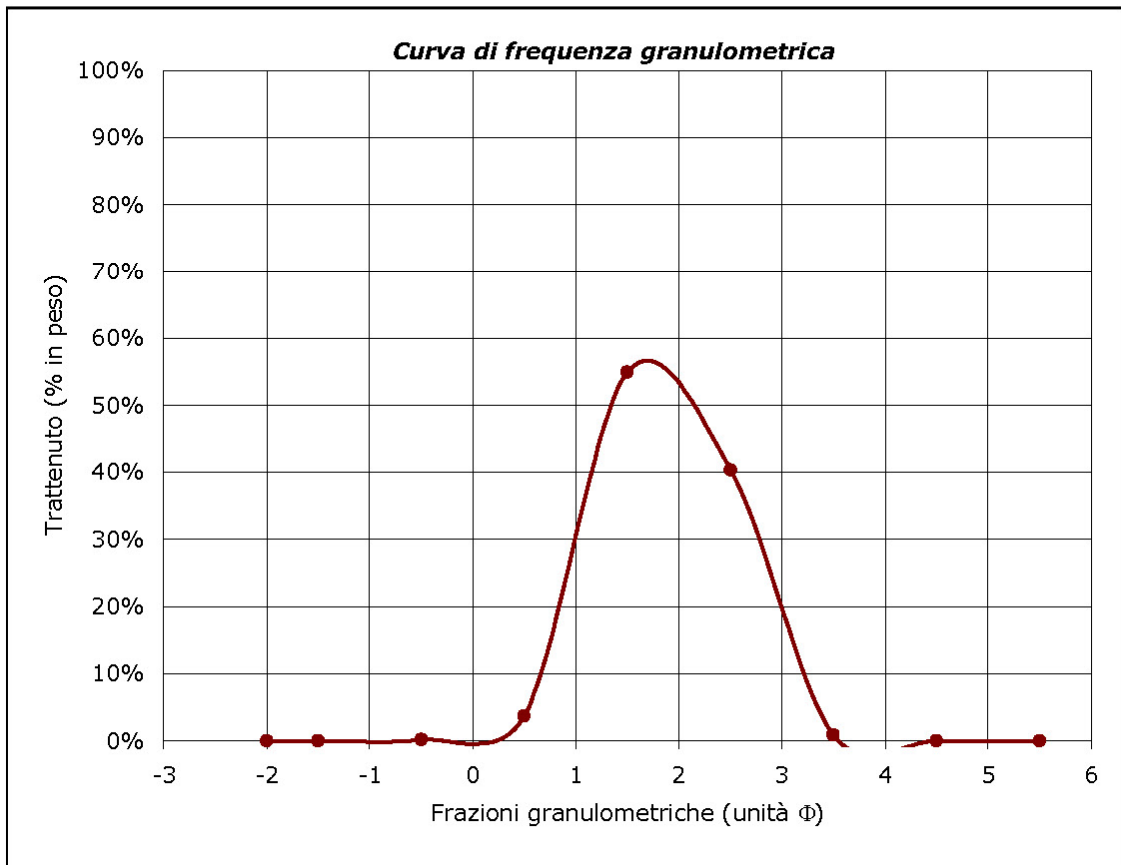


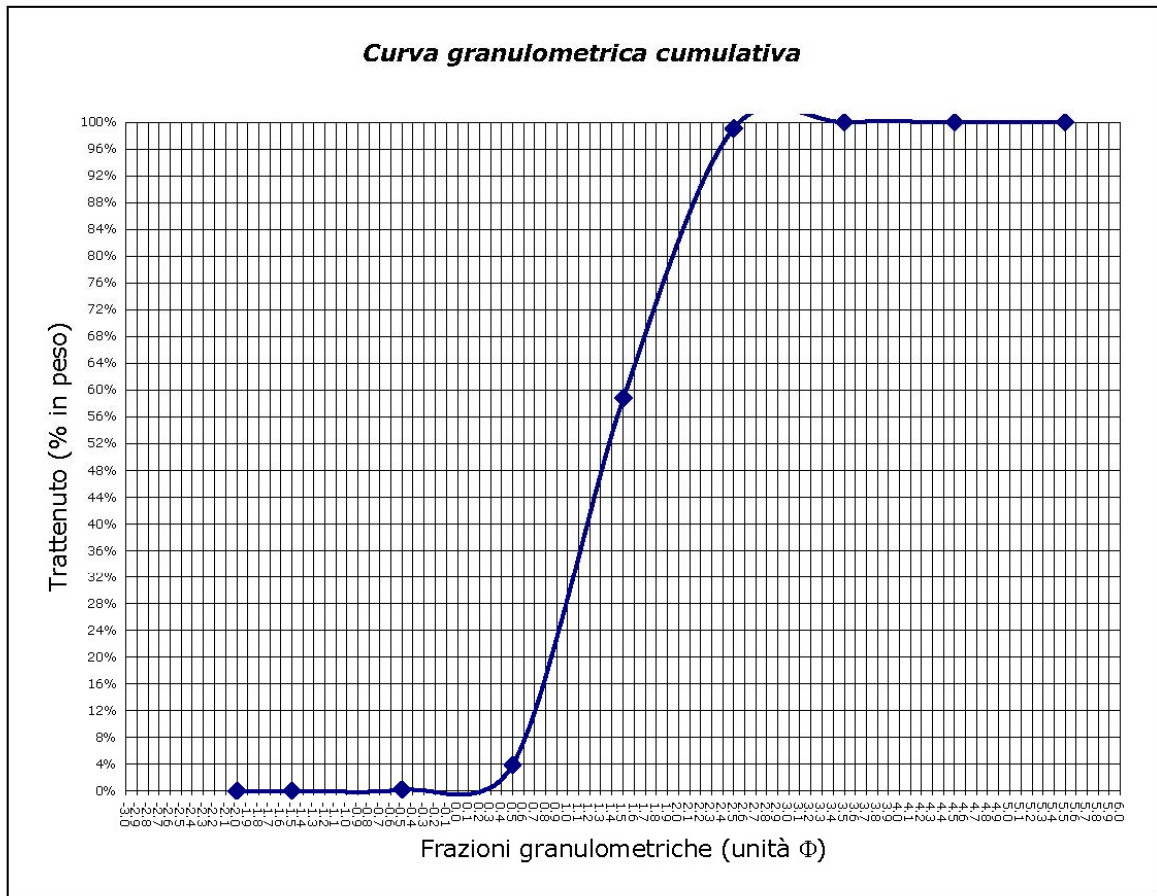


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P06	N 4 340 219,250	battigia	17.06.2007
	E 514 951,140		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	190,89	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,01	0,01%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,29	0,15%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	7,08	3,71%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	104,85	54,93%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	76,95	40,31%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	1,67	0,87%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,98%





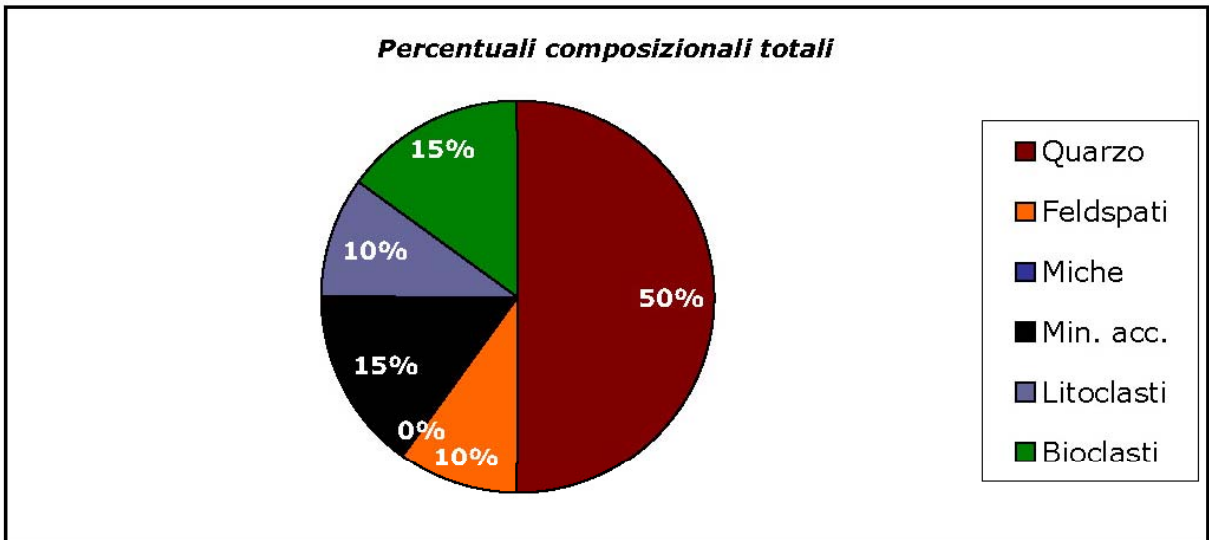
**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.60$$

Sedimento discretamente classato



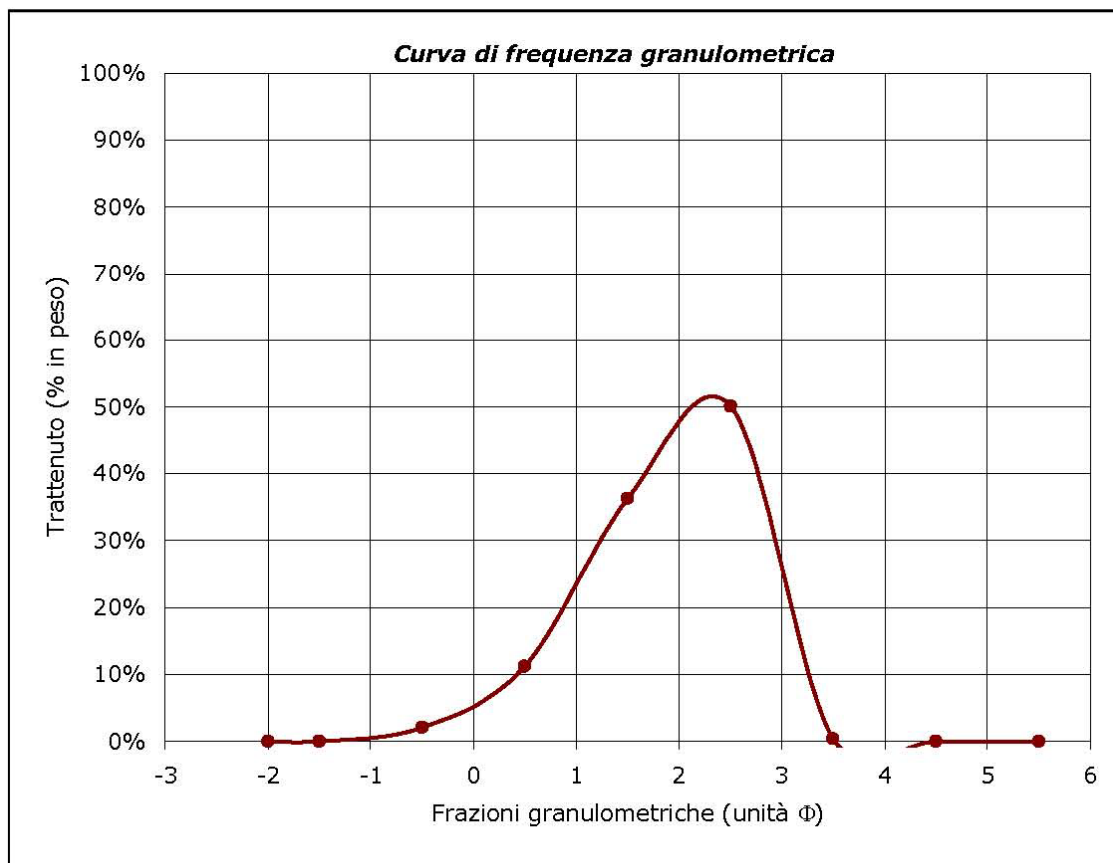
P06		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		50%	10%	0%	15%	10%	15%

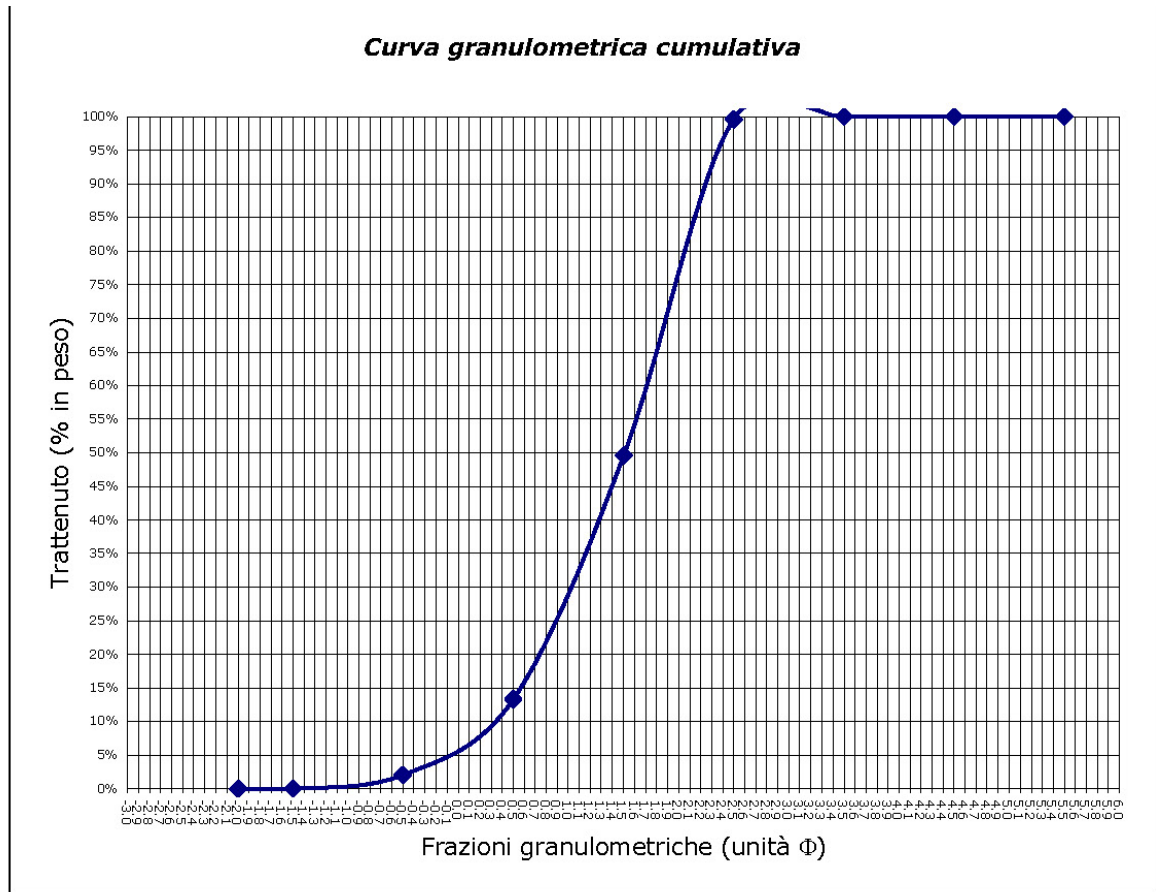


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P07	N 4 340 780,907	battigia	17.06.2007
	E 515 638,260		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	199,86	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,02	0,01%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	4,09	2,05%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	22,47	11,24%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	72,57	36,31%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	99,94	50,01%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0,74	0,37%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,98%





**Coefficiente di cernita**

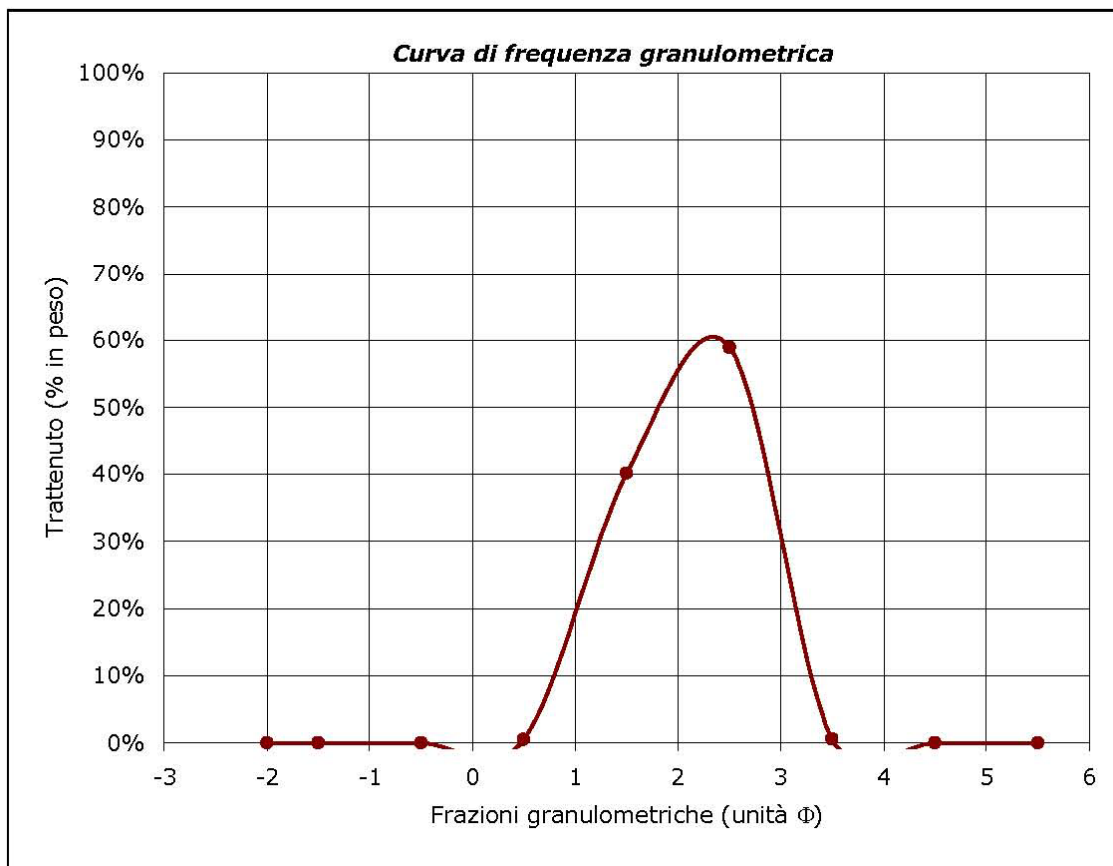
$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.75$$

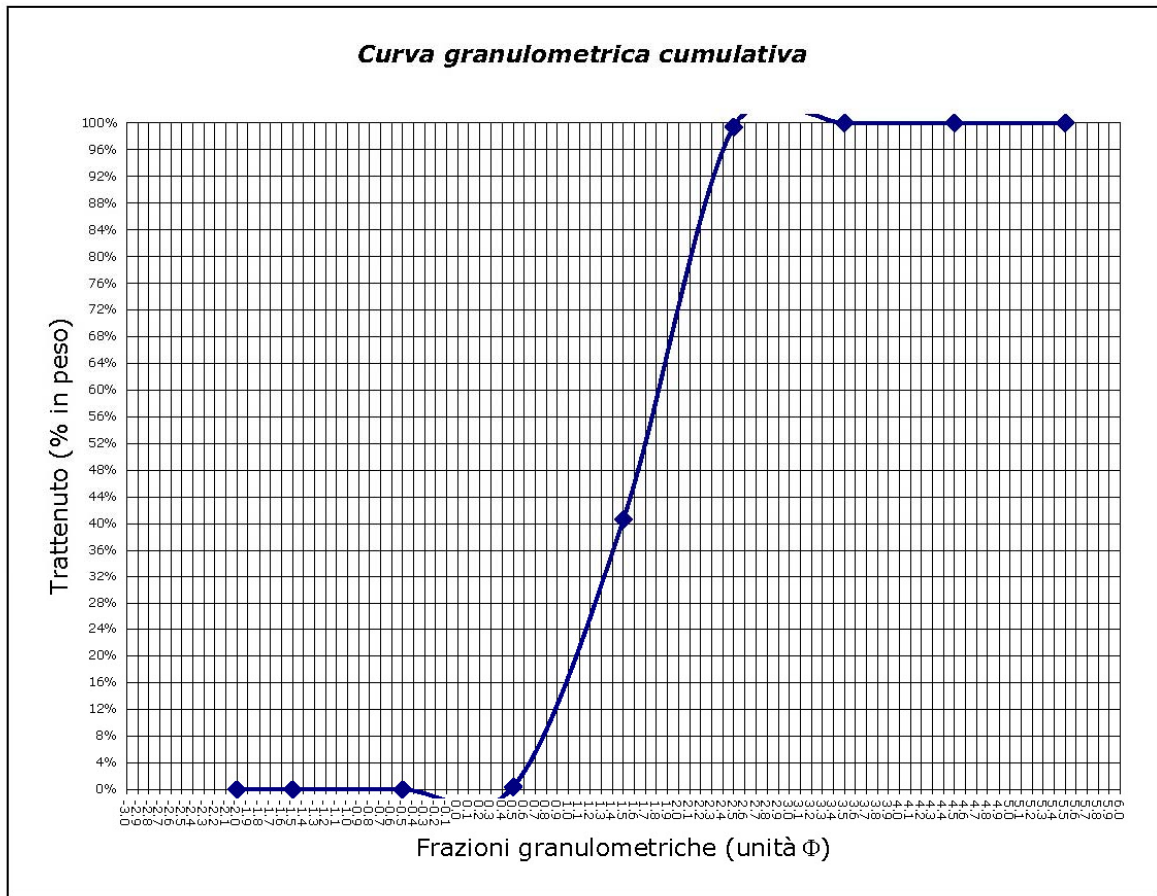
Sedimento discretamente classato

<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P08	N 4 341 215,137	battigia	17.06.2007
	E 516 335,172		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	142.83	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0.00	0.00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0.02	0.01%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	0.64	0.45%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	57.27	40.10%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	84.02	58.83%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0.88	0.62%
Fanghi	< 63	> 4	0.00	0.00%
				100.00%





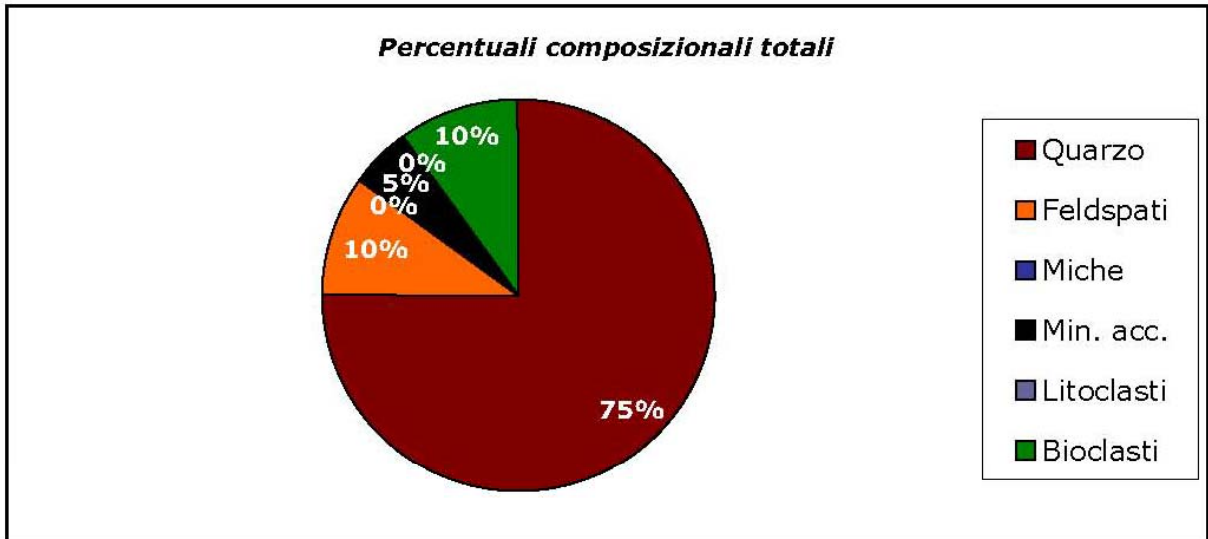
**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.60$$

Sedimento discretamente classato



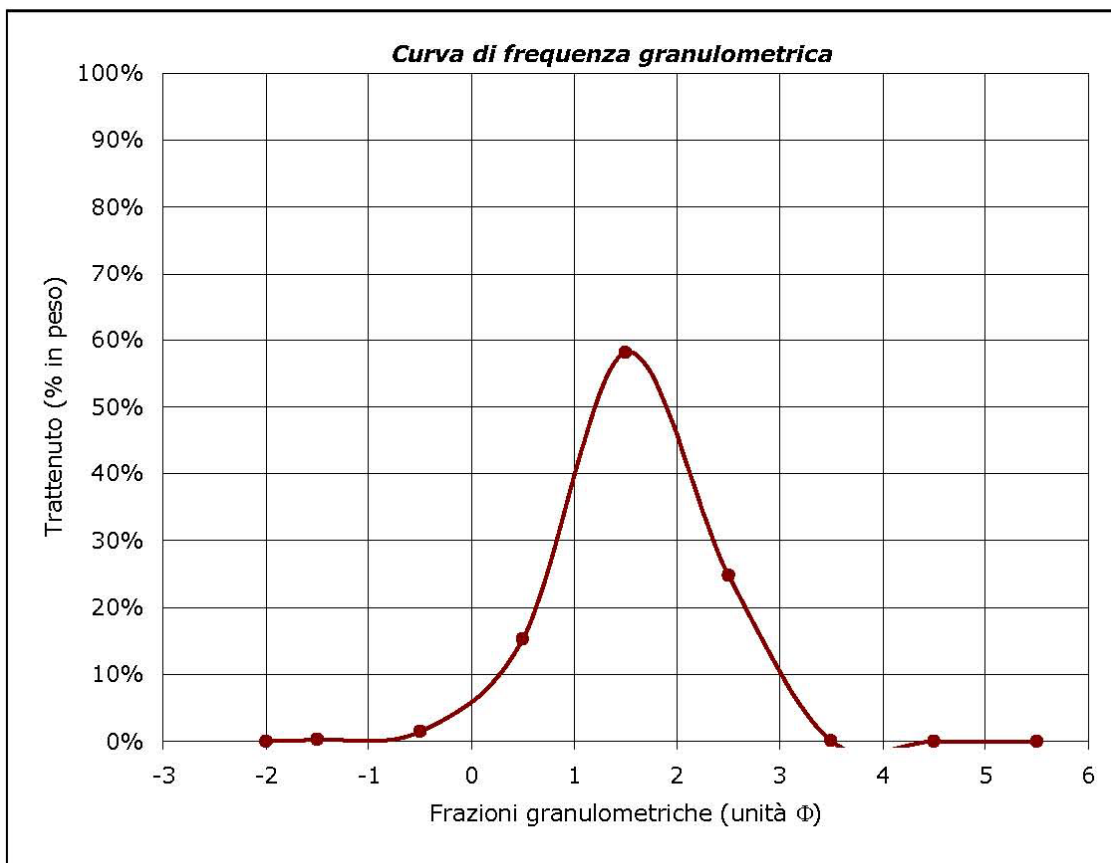
P08		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		75%	10%	0%	5%	0%	10%

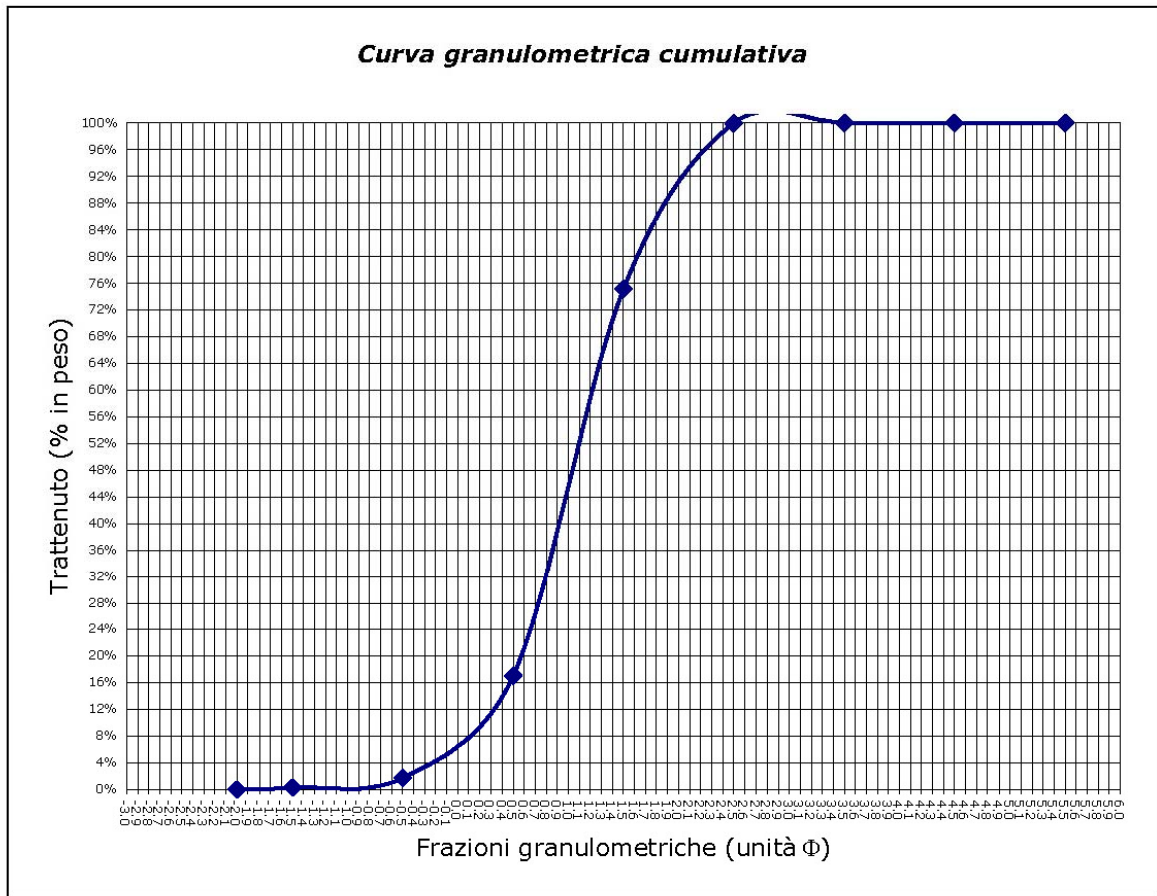


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P09	N 4 341 595,756	battigia	17.06.2007
	E 517 117,972		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	157,35	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,52	0,33%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	2,27	1,44%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	24,04	15,28%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	91,36	58,06%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	38,97	24,77%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0,18	0,11%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,99%





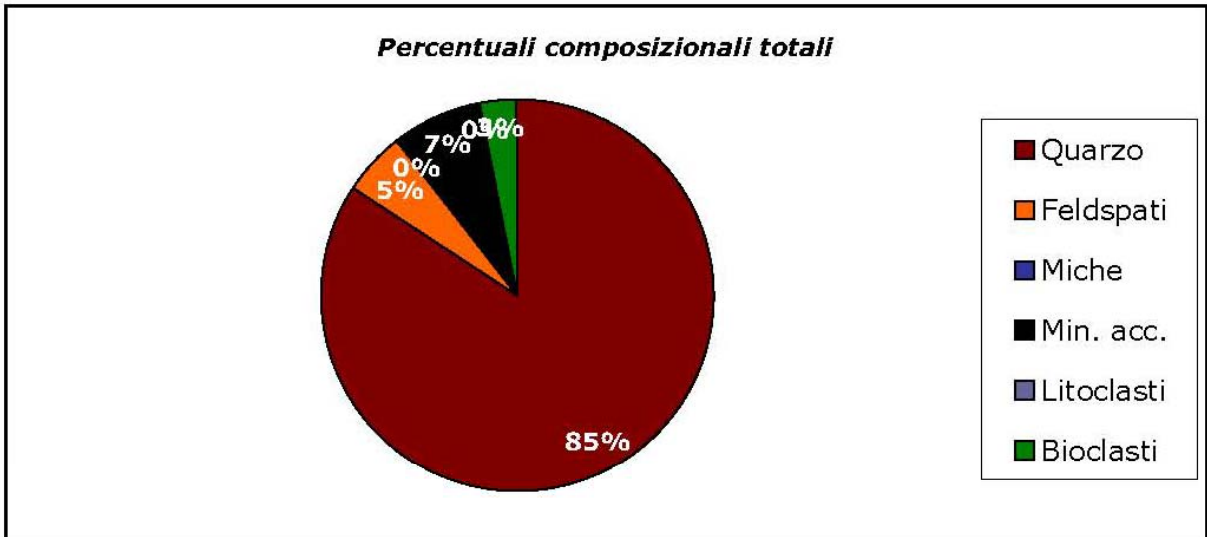
**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.65$$

Sedimento discretamente classato



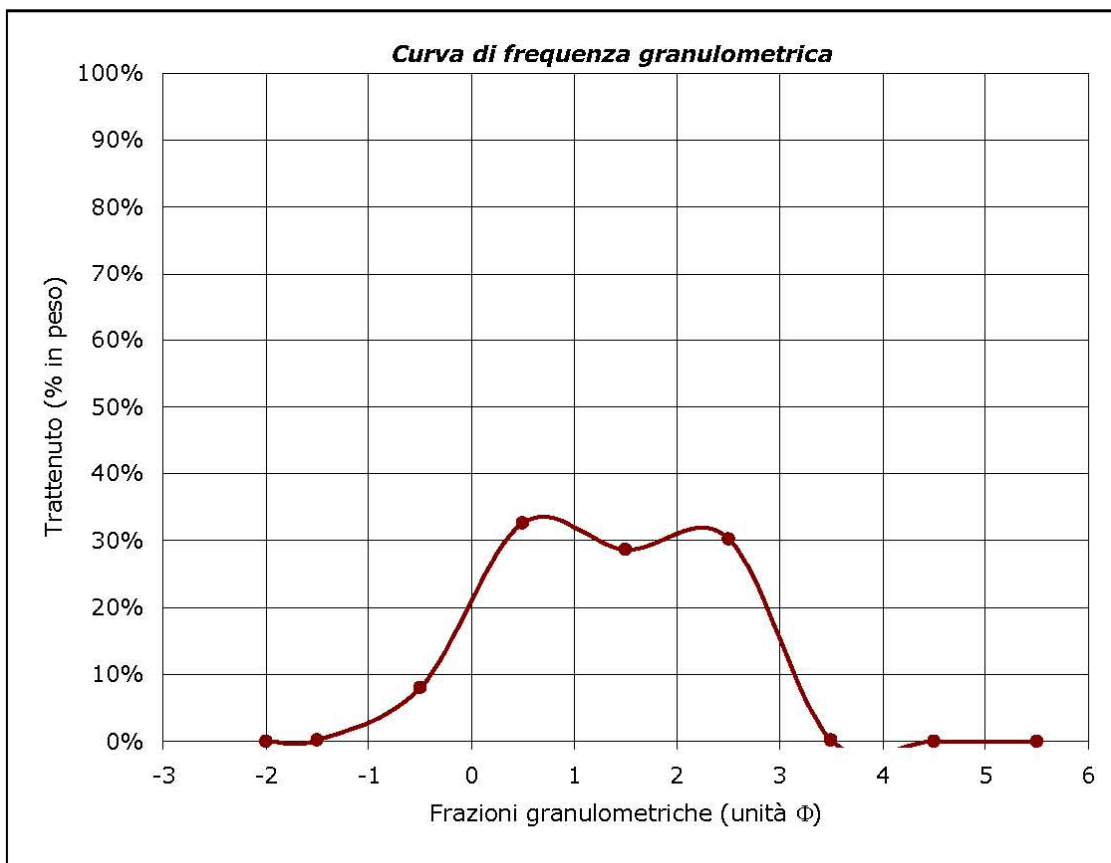
P09		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		80%	5%	0%	7%	0%	3%

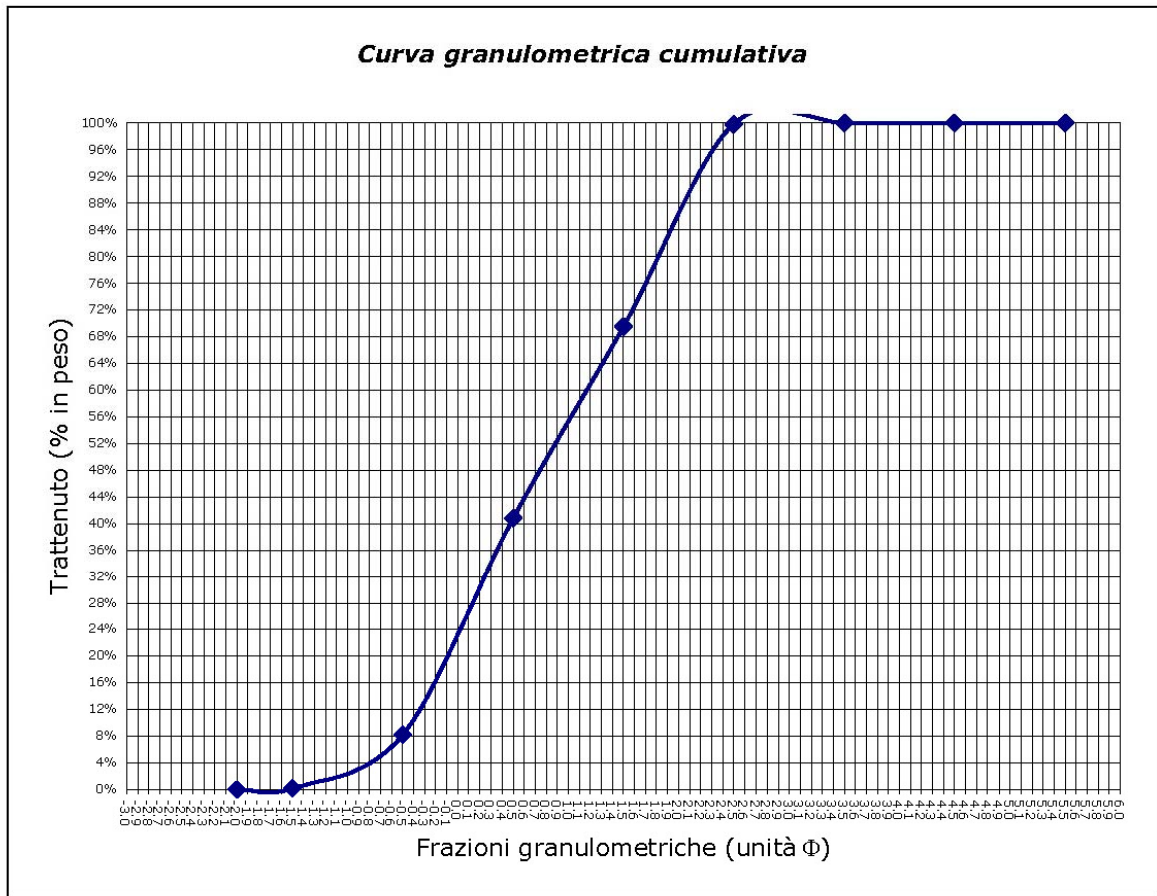


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P10	N 4 341 953,518	battigia	17.06.2007
	E 518 047,860		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	197,53	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,43	0,22%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	15,85	8,02%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	64,34	32,57%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	56,64	28,67%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	59,80	30,27%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0,44	0,22%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,98%



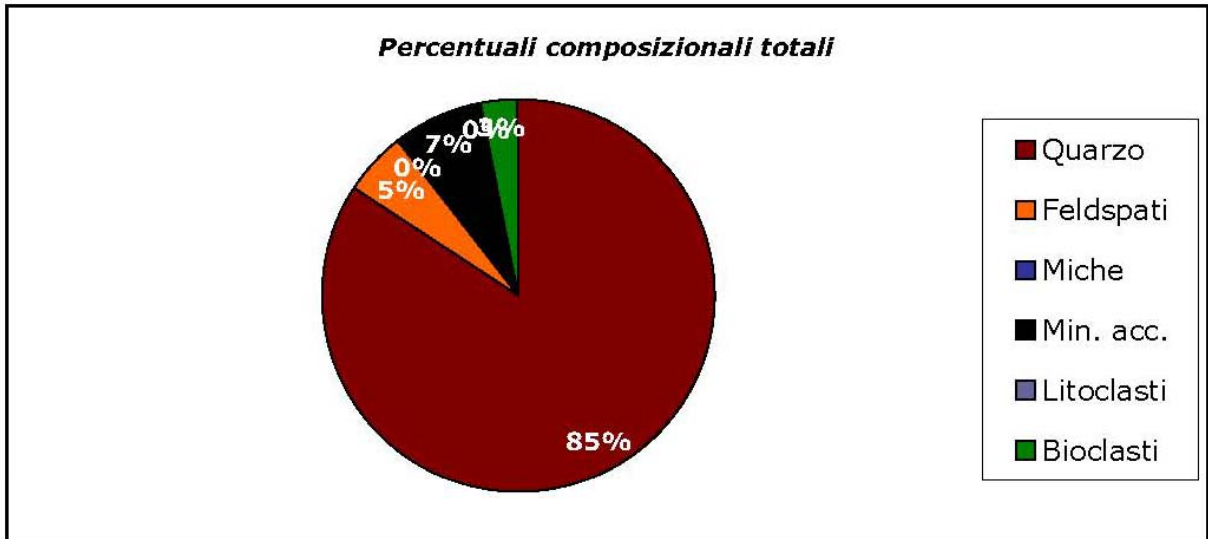


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 1.10$$

Sedimento mediocrementemente classato

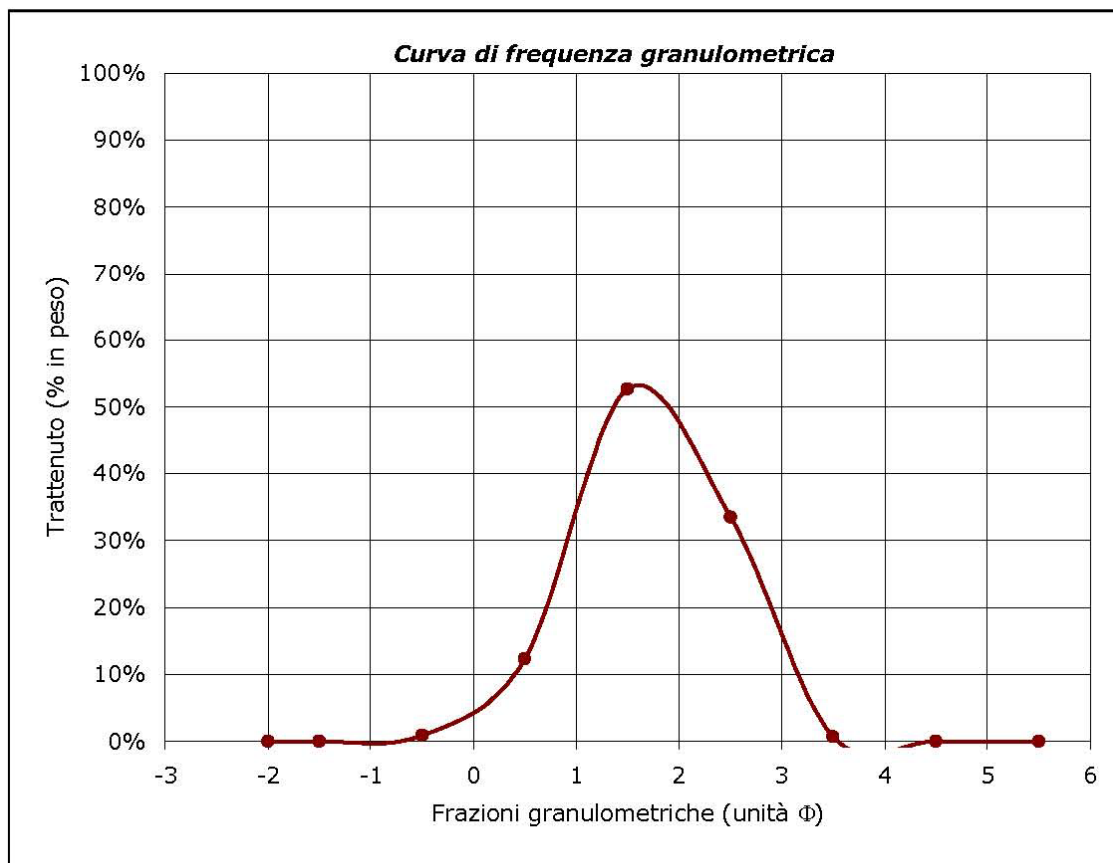
P10		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		80%	5%	0%	7%	0%	3%

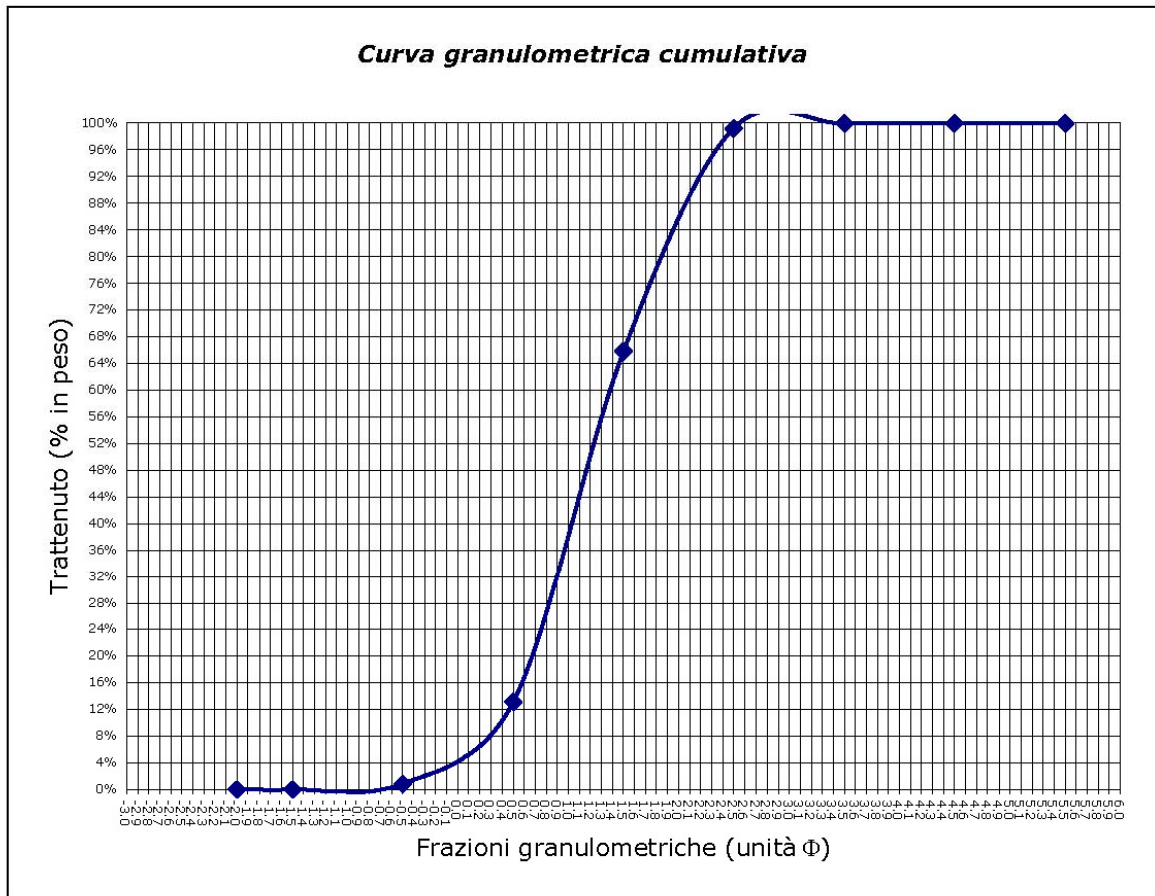


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P11	N 4 342 053,843	battigia	17.06.2007
	E 518 635,871		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	103,39	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,02	0,02%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,88	0,85%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	12,69	12,27%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	54,37	52,59%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	34,61	33,48%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0,70	0,68%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,88%





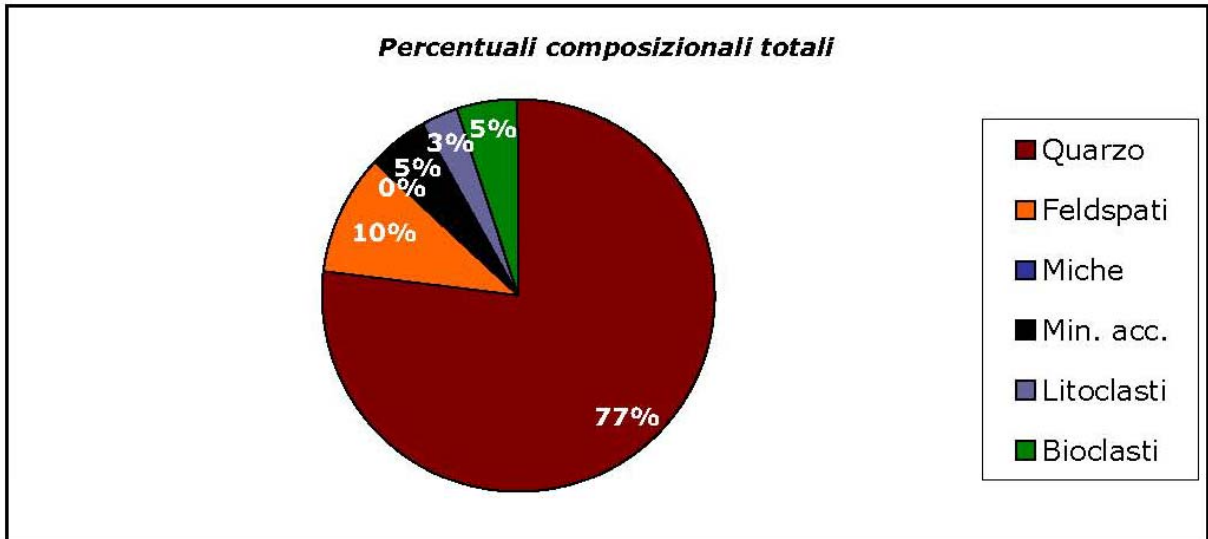
**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.70$$

Sedimento discretamente classato



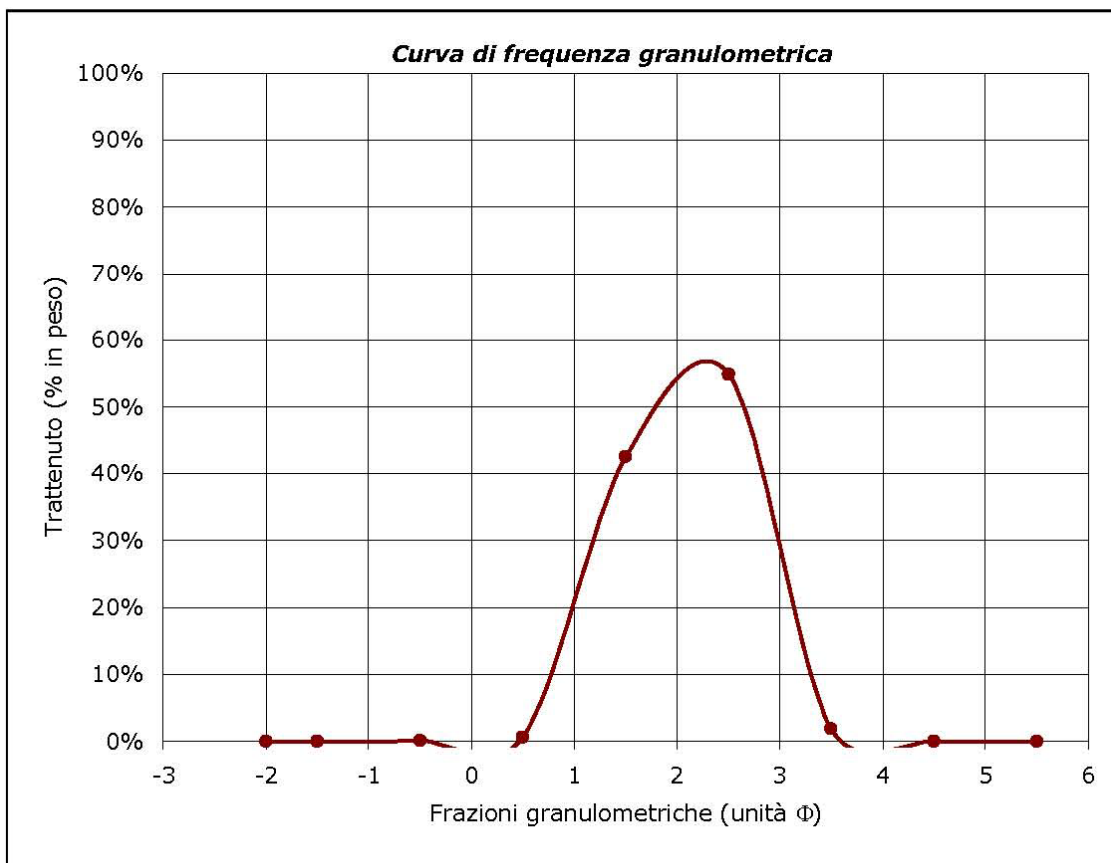
P11		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		77%	10%	0%	5%	3%	5%



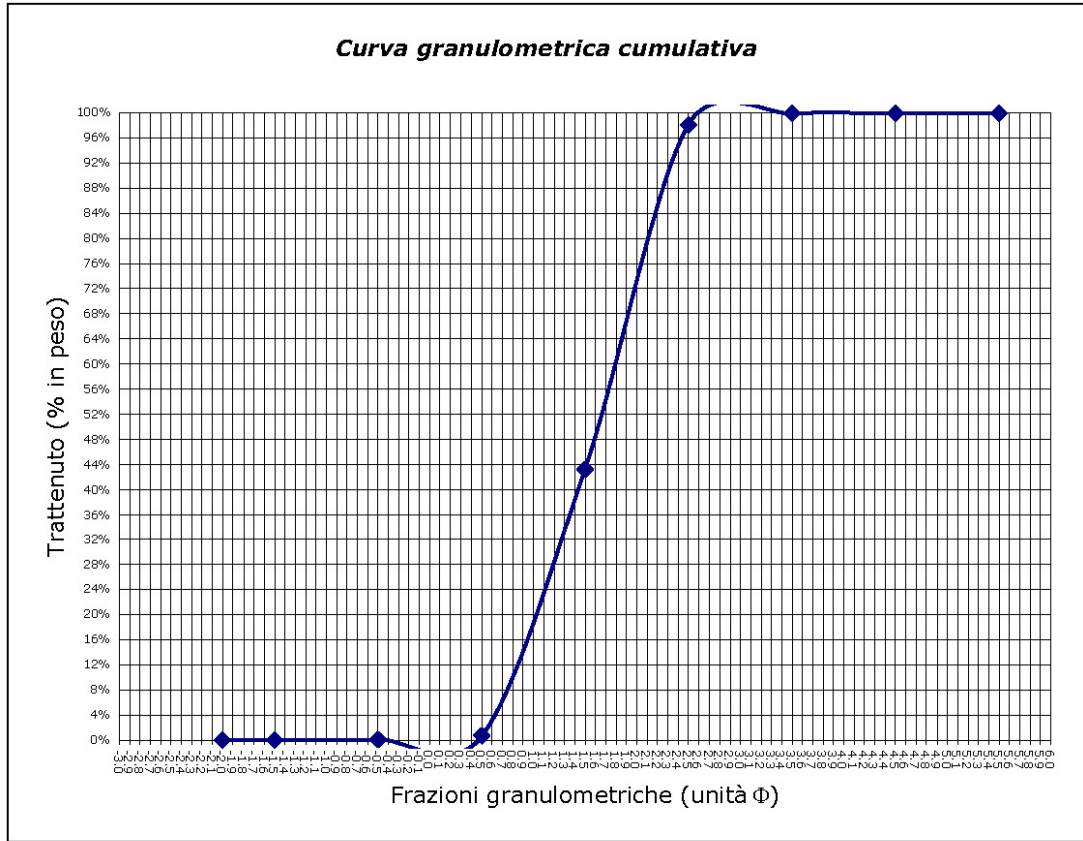
<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
P12	N 4 342 125,785	battigia	17.06.2007
	E 519 743,106		

<b>Rilevatori</b>
Alessandro Lai

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	126,30	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,00	0,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,07	0,06%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	0,80	0,63%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	53,73	42,54%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	69,22	54,81%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	2,40	1,90%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				99,94%





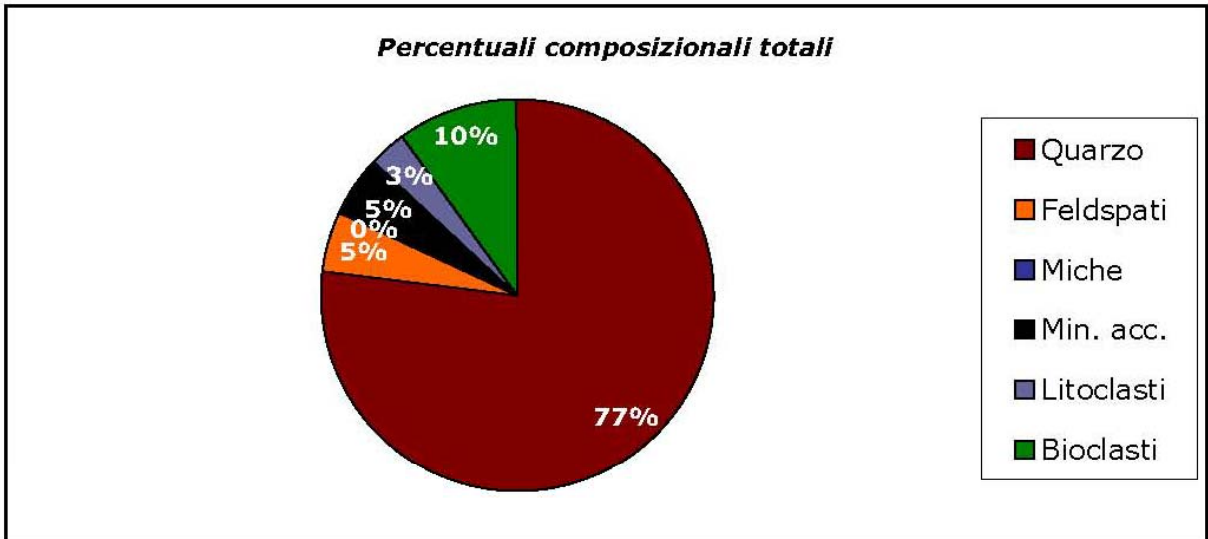


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.65$$

Sedimento discretamente classato

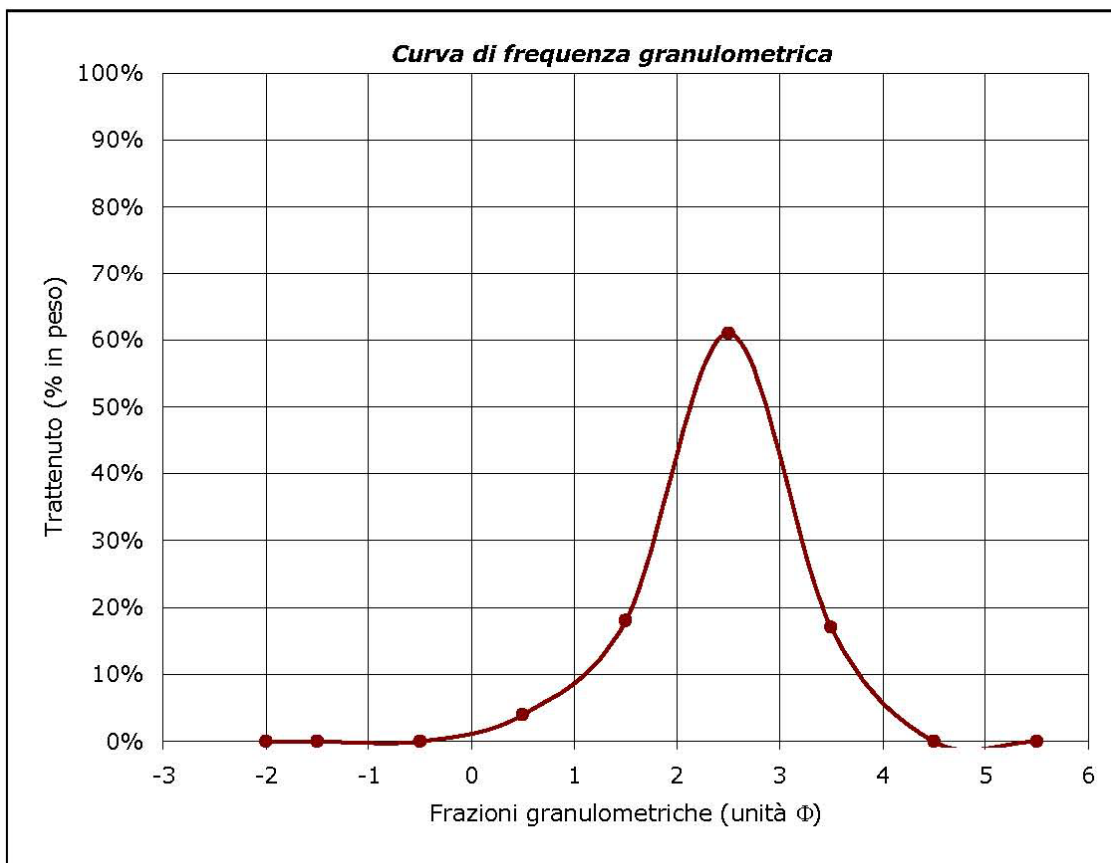
P12		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		77%	5%	0%	5%	3%	10%

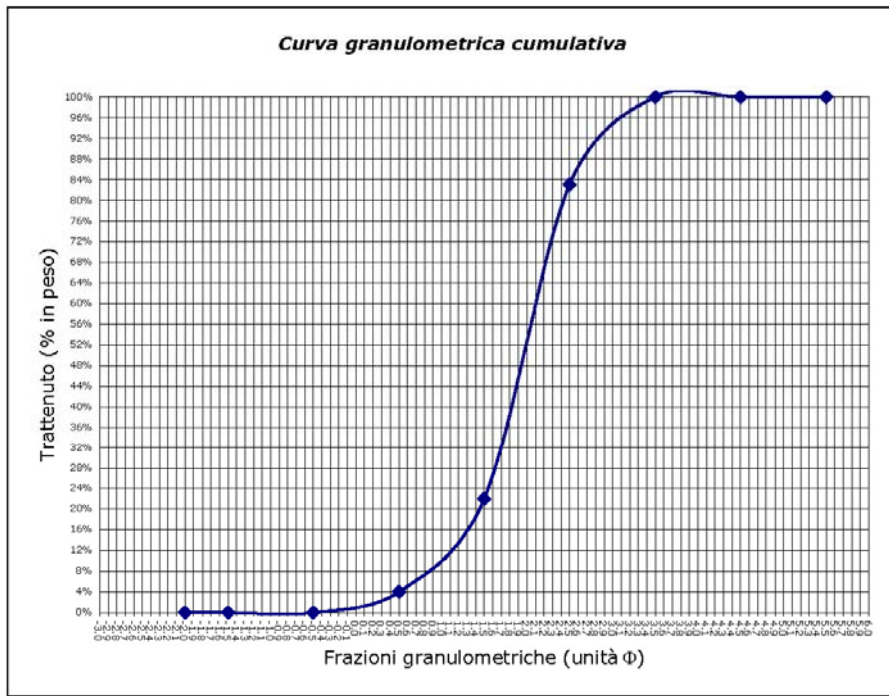


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 23	N 4342106.133	battigia	19.02.2003
	E 519854.635		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100,00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,00	0,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0,00	0,00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	4,00	4,00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	18,00	18,00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	61,00	61,00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	17,00	17,00%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				100,00%



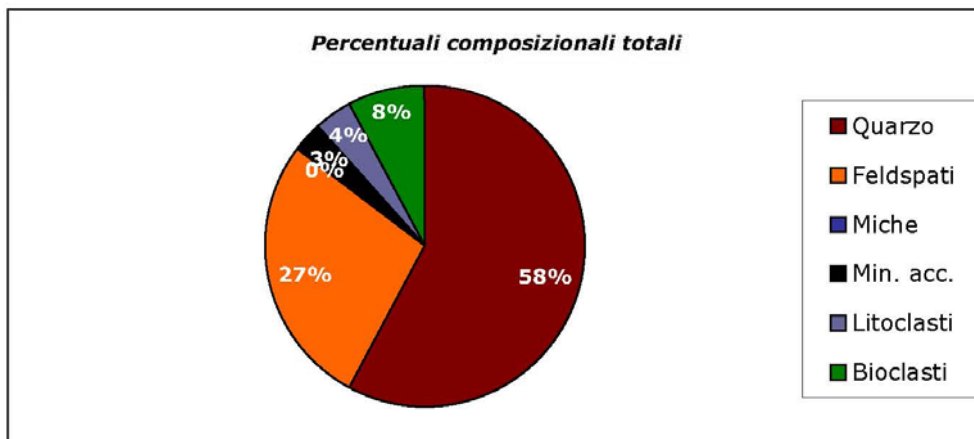


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.65$$

Sedimento discretamente classato

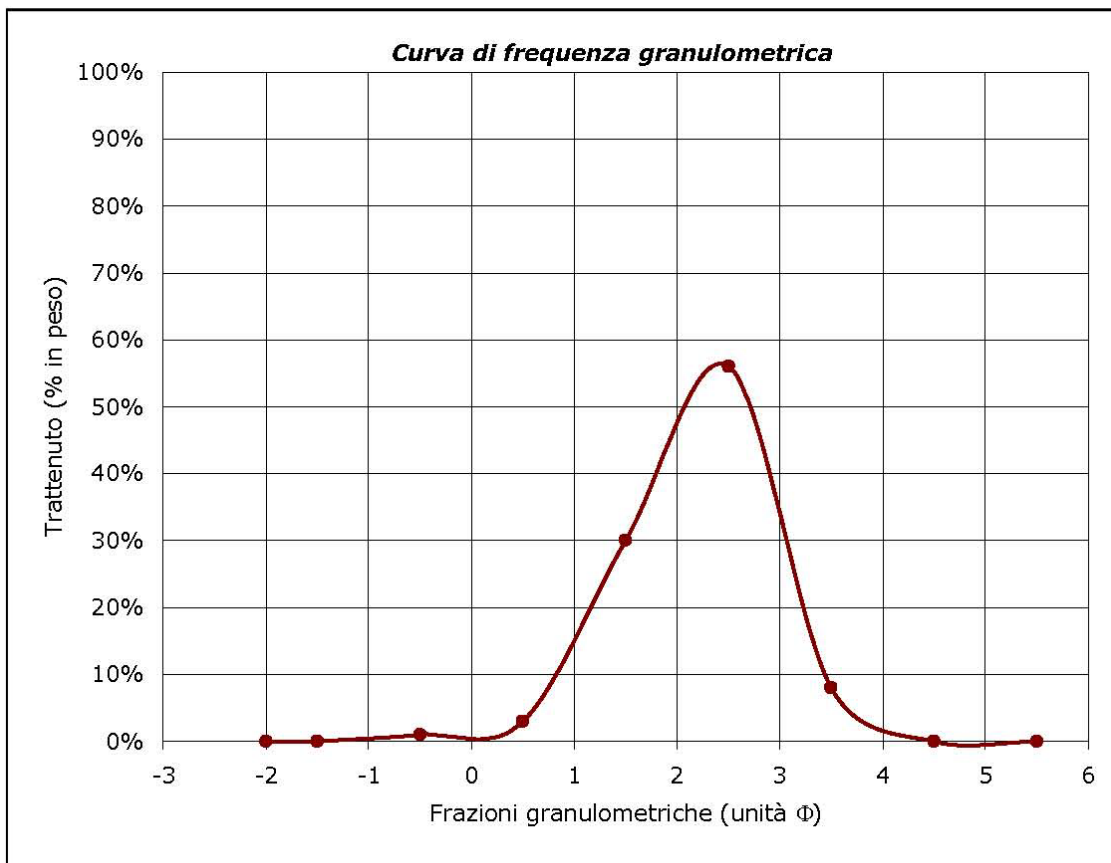
RC 23 <b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>							
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		59%	28%	0%	3%	4%	8%

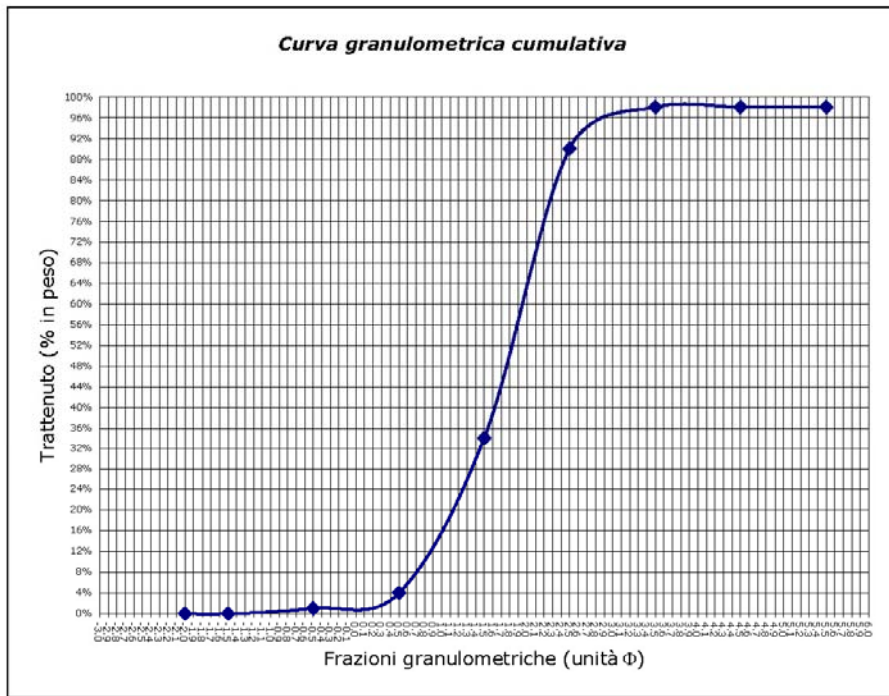


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 24	N 4342061.013	battigia	19.02.2003
	E 518856.816		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100,00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0,00	0,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	1,00	1,00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	3,00	3,00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	30,00	30,00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	56,00	56,00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	8,00	8,00%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				98,00%



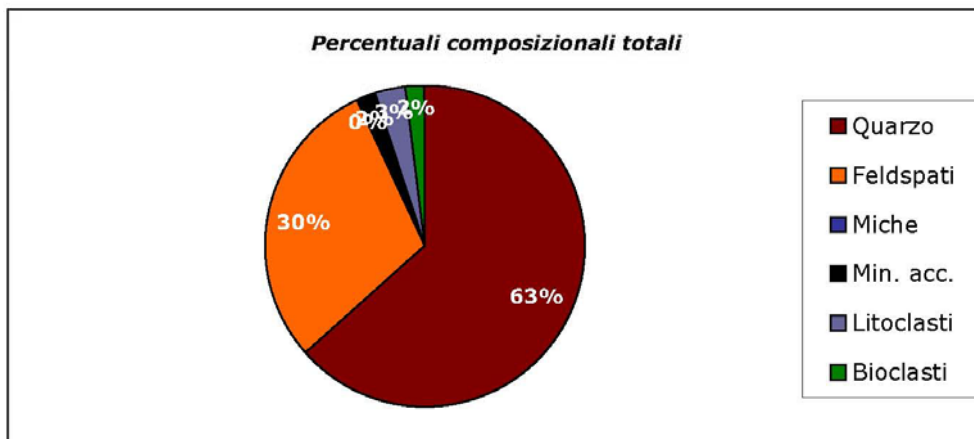


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.65$$

Sedimento discretamente classato

RC 24		<b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>					
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		64%	30%	0%	2%	3%	2%

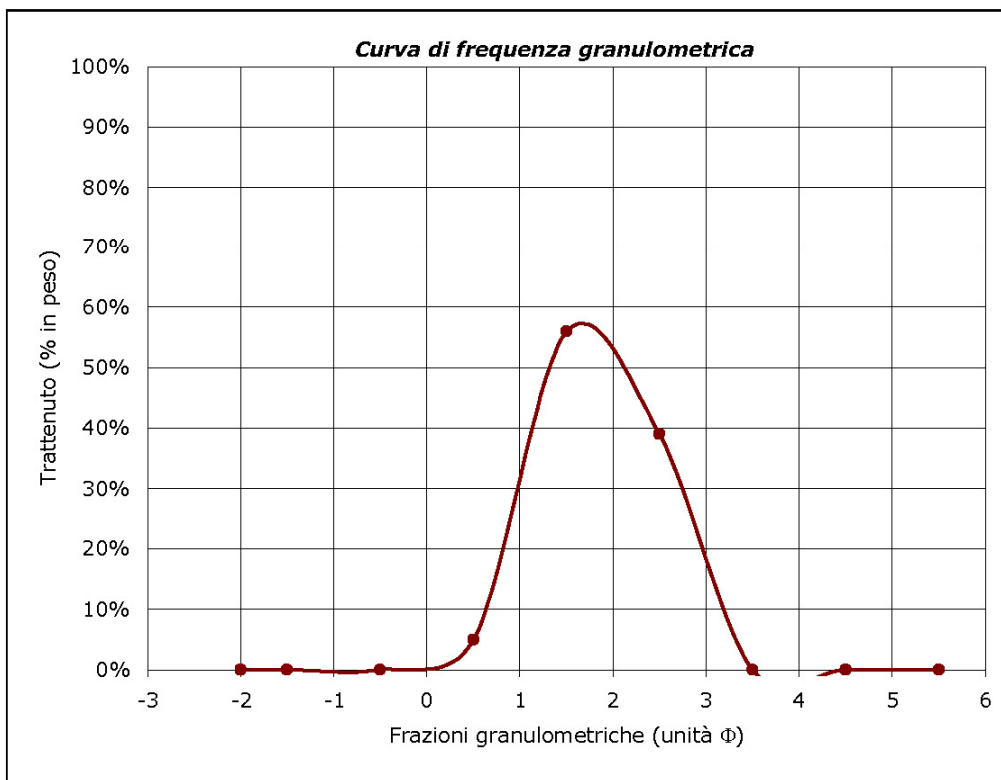


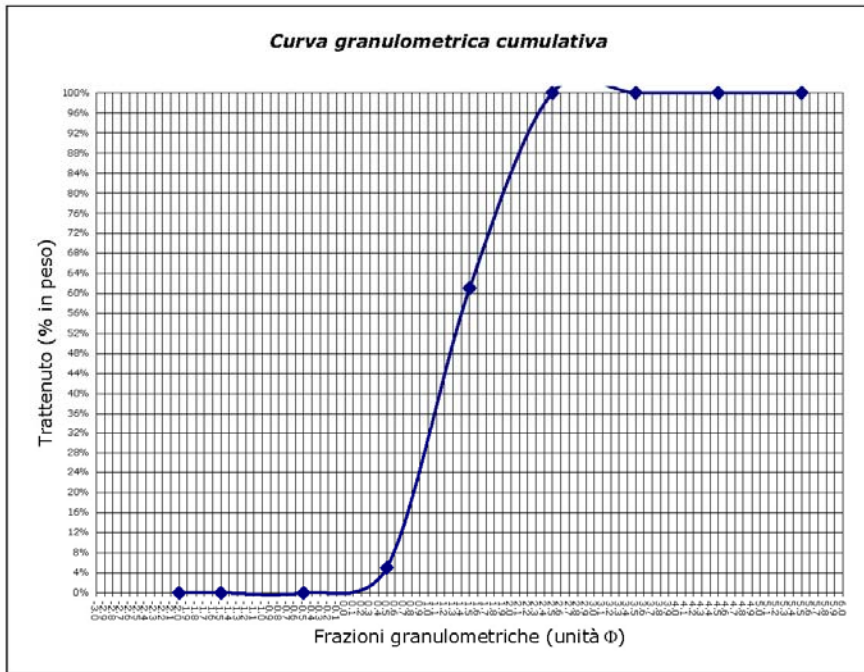


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 25	N 4341790.830	battigia	19.02.2003
	E 517605.153		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

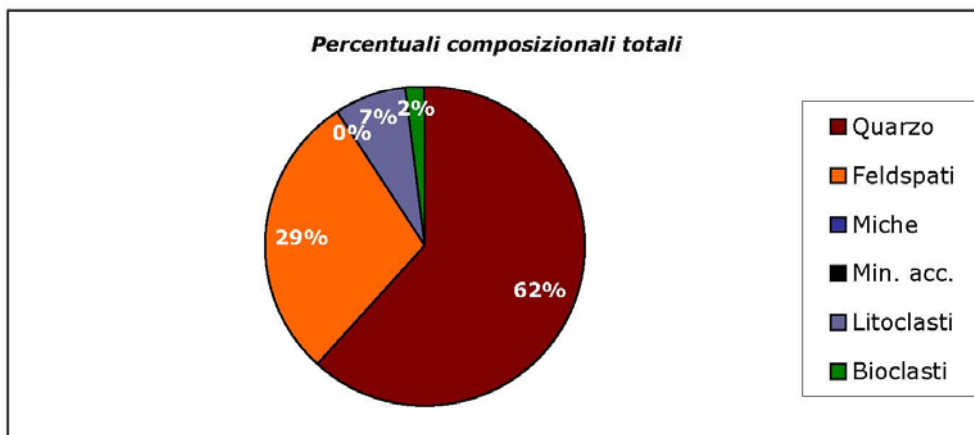
<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100.00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	0.00	0.00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	0.00	0.00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	5.00	5.00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	56.00	56.00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	39.00	39.00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0.00	0.00%
Fanghi	< 63	> 4	0.00	0.00%
				100.00%





**Coefficiente di cernita**  
 $\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.65$   
 Sedimento discretamente classato

RC 25 <b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>							
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		61%	29%	0%	0%	7%	2%

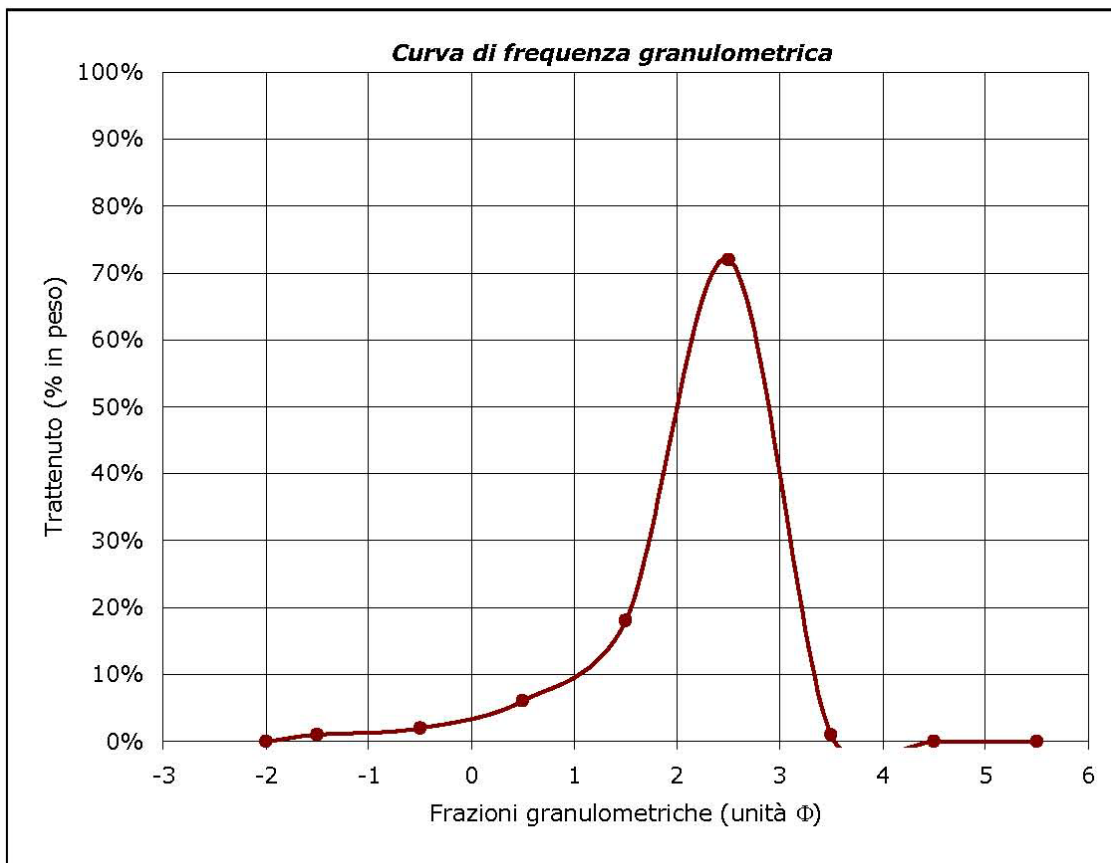


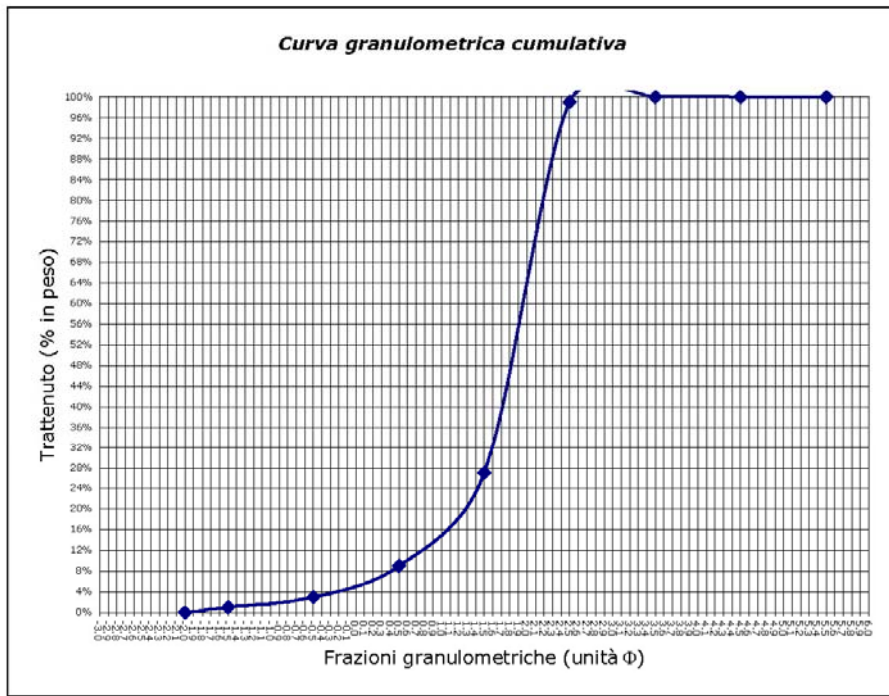


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 26	N 4340802.762	battigia	19.02.2003
	E 515704.300		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100,00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	1,00	1,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	2,00	2,00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	6,00	6,00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	18,00	18,00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	72,00	72,00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	1,00	1,00%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				100,00%



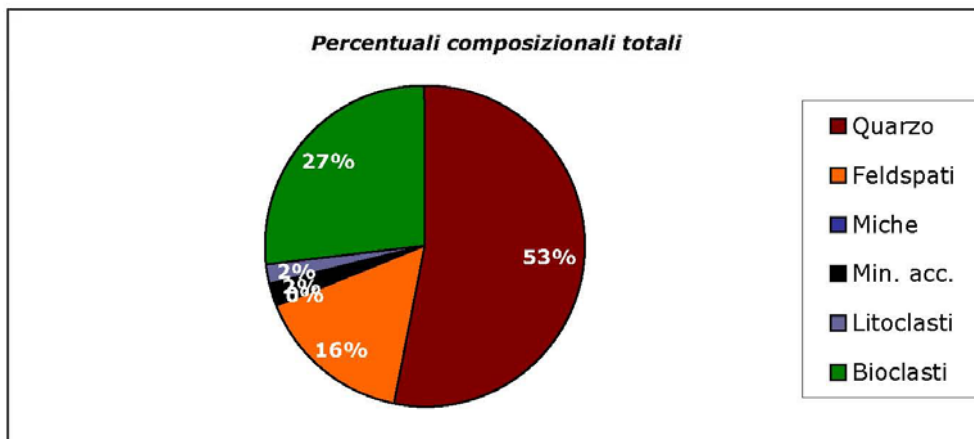


**Coefficiente di cernita**

$$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.55$$

Sedimento discretamente classato

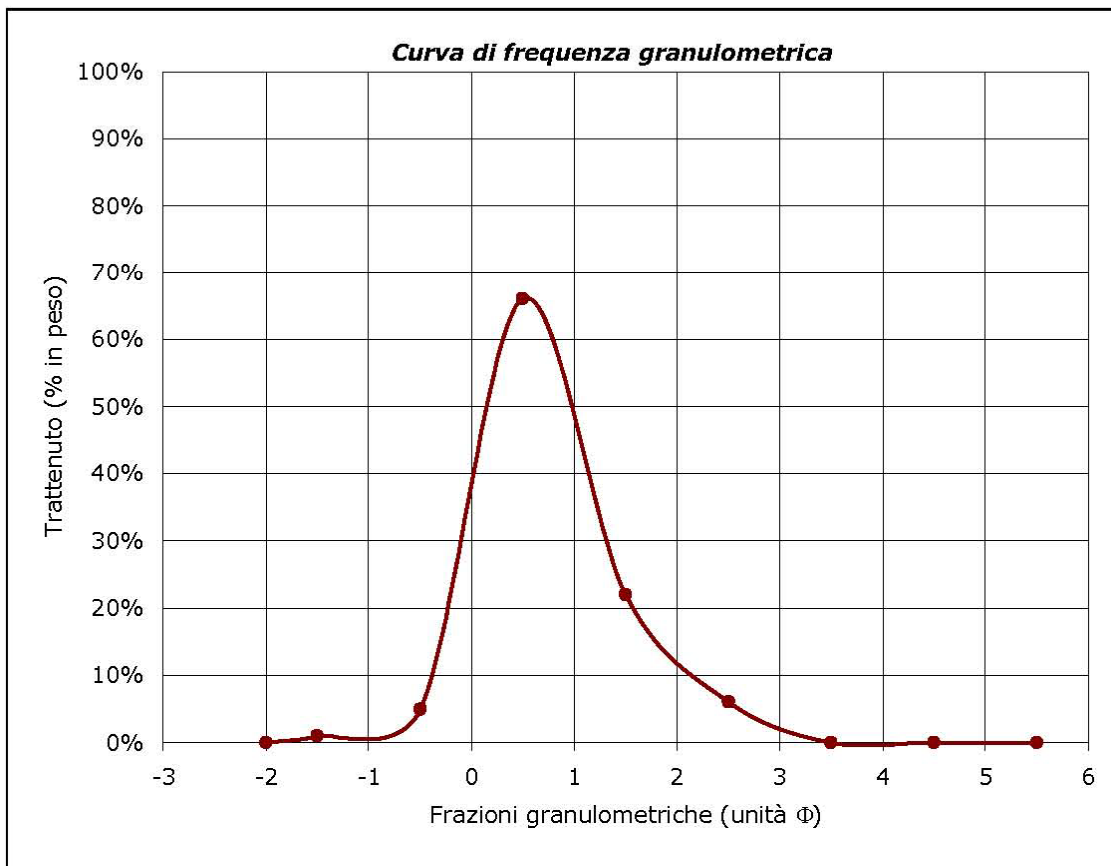
RC 26 <b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>							
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		53%	16%	0%	2%	2%	27%

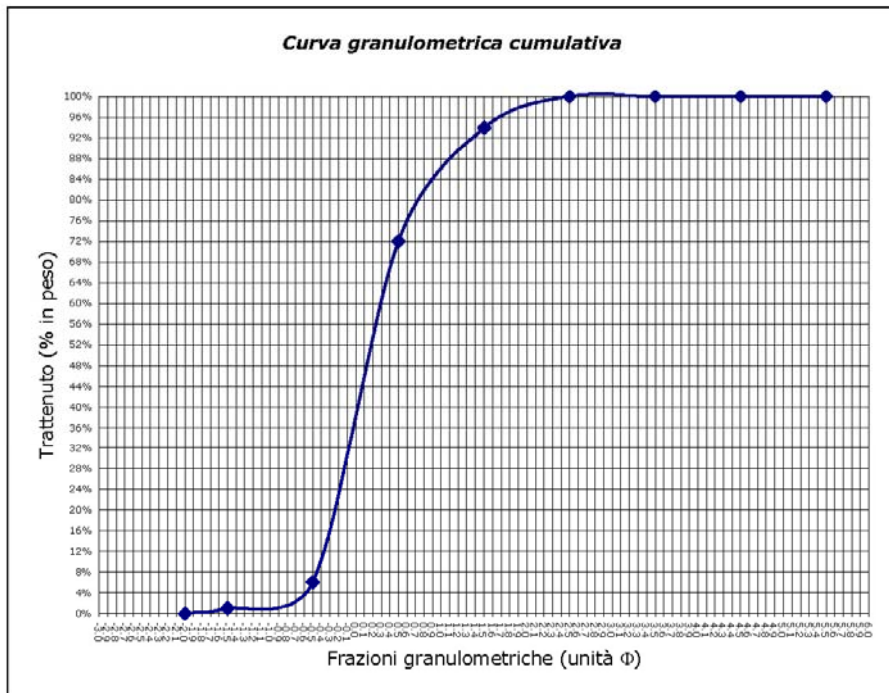


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 27	N 4339850.417	battigia	19.02.2003
	E 514654.018		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

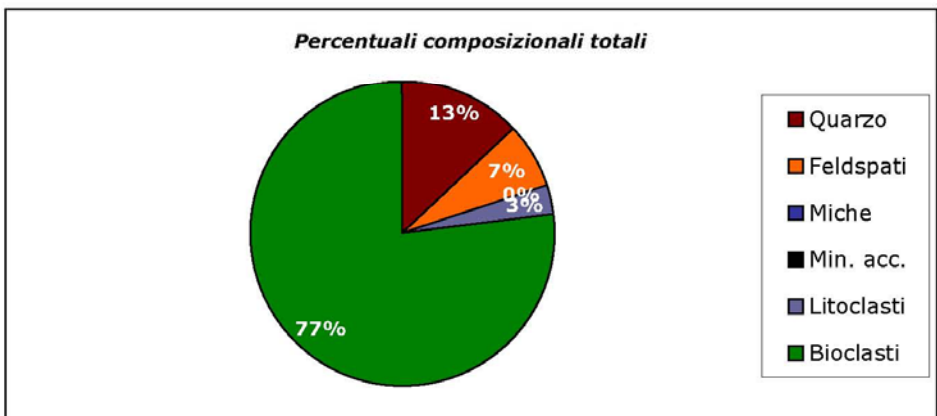
<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100.00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	1.00	1.00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	5.00	5.00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	66.00	66.00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	22.00	22.00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	6.00	6.00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	0.00	0.00%
Fanghi	< 63	> 4	0.00	0.00%
				100.00%





**Coefficiente di cernita**  
 $\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 0.70$   
 Sedimento discretamente classato

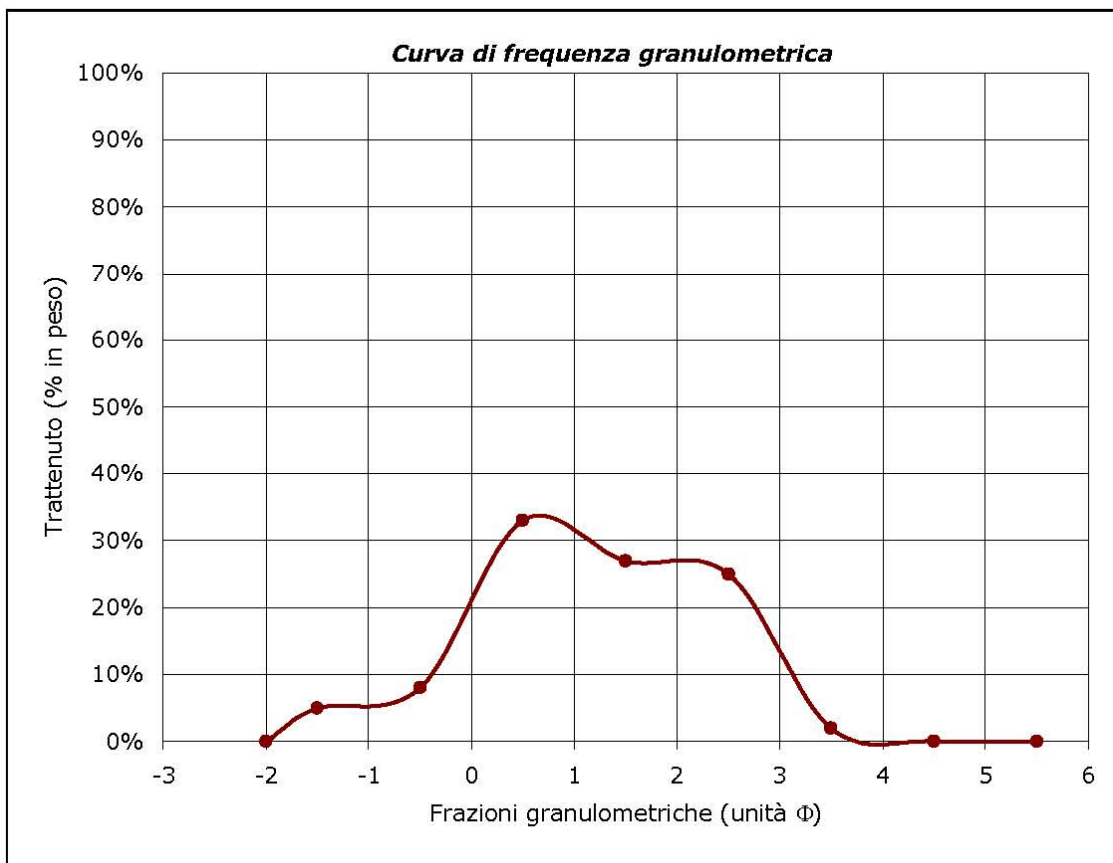
RC 27 <b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>							
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		13%	7%	0%	0%	3%	77%

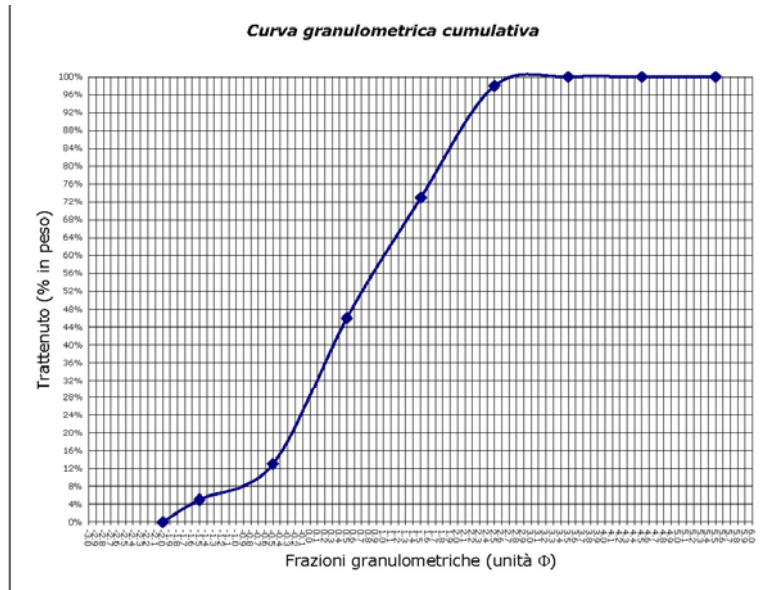


<b>Campione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Data di prelievo</b>
RC 28	N 4338460.488	battigia	19.02.2003
	E 513815.561		

<b>Rilevatori</b>
Michele Cossellu

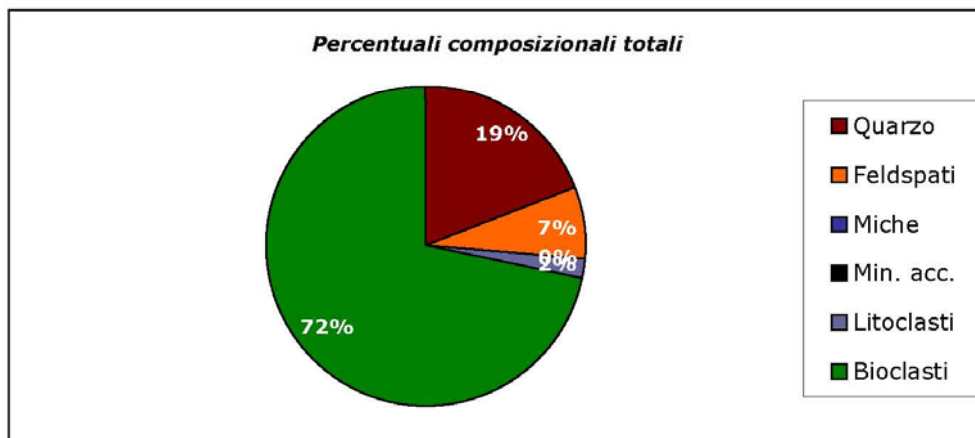
<b>Analisi granulometrica</b>				
Classe granulometrica	Diametro dei granuli		Peso totale (g)	Percentuali in peso
	( $\mu\text{m}$ )	( $\Phi$ )	100,00	
			Peso frazioni (g)	
Ghiaia	> 2000	< -1	5,00	5,00%
Sabbia molto grossa	2000 ÷ 1000	-1 ÷ 0	8,00	8,00%
Sabbia grossa	1000 ÷ 500	0 ÷ 1	33,00	33,00%
Sabbia media	500 ÷ 250	1 ÷ 2	27,00	27,00%
Sabbia fine	250 ÷ 125	2 ÷ 3	25,00	25,00%
Sabbia molto fine	125 ÷ 63	3 ÷ 4	2,00	2,00%
Fanghi	< 63	> 4	0,00	0,00%
				100,00%





<b>Coefficiente di cernita</b>
$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2 = 1.20$
Sedimento mediocrementemente classato

RC 28 <b>Riconoscimento composizionale al microscopio binoculare</b>							
	% in peso	Quarzo	Feldspati	Miche	Min. acc.	Litoclasti	Bioclasti
Componenti totali		19%	7%	0%	0%	2%	71%






Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Scienze della Terra Laboratorio di Petrografia dei Sedimenti e Sedimentologia								
<b>COMMITTENTE</b>		Amministrazione Provinciale di Cagliari - Assessorato Viabilità e Trasporti						
<b>O P E R A</b>		Lavori di salvaguardia del litorale del Poetto e strada di collegamento						
<b>ANALISI PETROGRAFICA SABBIA - COMPOSIZIONE MODALE D'INSIEME</b>								
Campione	(2) 1		(2) 2		(2) 3		(2) 4	
Classe granul. modale (mm)	0.500-0.350		0.500-0.350		0.500-0.350		0.500-0.350	
	conta	percento	conta	percento	conta	percento	conta	percento
Quarzo unitario e composito	100	35,3	94	35,5	74	25,7	99	36,7
Quarzo compos. microcrist.	1	0,4	2	0,8	1	0,3	1	0,4
Quarzo in F. Rocce ignee	10	3,5	10	3,8	3	1,0	5	1,9
Quarzo in F.R. sedimentarie	1	0,4	0	0,0	0	0,0	1	0,4
K-Feldspato (con Microcl.)	38	13,4	38	14,3	42	14,6	48	17,8
K-F in Frammenti di Rocce	5	1,8	7	2,6	3	1,0	6	2,2
Plagioclasio / Feld. alterato	28	9,9	16	6,0	14	4,9	16	5,9
Plag. in Frammenti di Rocce	2	0,7	0	0,0	1	0,3	0	0,0
Semiscisto / Fillite / Slate	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Scisto a Quarzo e Mica ch.	0	0,0	1	0,4	1	0,3	0	0,0
Altri scisti di basso grado	1	0,4	2	0,8	1	0,3	6	2,2
Scisti di alto grado	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Porfiroide	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Tufite	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Felsofiro / Microgran. a Q-F	2	0,7	0	0,0	1	0,3	1	0,4
Riolite / Dacite	1	0,4	1	0,4	0	0,0	0	0,0
Trachite / Spillite	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Andesite / Basalto	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Ultramafite / Serpentinite	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Radiolarite / Diaspro	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Bioselce impura/calcitizzata	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Shale	0	0,0	1	0,4	1	0,3	0	0,0
Siltite quarzo-feldspatica	2	0,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Siltite litica / Calcsiltite	0	0,0	1	0,4	0	0,0	1	0,4
Alterite silicoclastica	1	0,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Alterite carbonatica	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Laminite algale / Micrite pell.	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Biomcrite	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Biospatite - Biollite	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Grainstone	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Calcare cristallino	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Dolomia fine-mediocristall.	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Mica chiara / M. sc./Clorite	2	0,7	1	0,4	1	0,3	1	0,4
Mica in Frammenti di Rocce	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Pesante traspar / P. opaco	0	0,0	1	0,4	1	0,3	1	0,4
Grano autigeno piattaforma.	2	0,7	1	0,4	3	1,0	3	1,1
Foraminifero	5	1,8	9	3,4	15	5,2	4	1,5
Detrito Gast./Lamel./Echin.	34	12,0	33	12,5	55	19,1	30	11,1
Detrito Alga incr./Briozoo	21	7,4	22	8,3	33	11,5	18	6,7
Detrito corallinaceo	27	9,5	25	9,4	38	13,2	29	10,7
<b>Totale</b>	<b>283</b>	<b>100,0</b>	<b>265</b>	<b>100,0</b>	<b>288</b>	<b>100,0</b>	<b>270</b>	<b>100,0</b>
PARMA 14.06.02	ANALISTA Dott.ssa M. A. Calzolari <i>Calzolari</i>		RESPONSABILE DEL LABORATORIO Prof. Benzo Valloni <i>Benzo</i>					



Università degli Studi di Parma - Dipartimento di Scienze della Terra Laboratorio di Petrografia dei Sedimenti e Sedimentologia						
<b>COMMITTENTE</b>		Amministrazione Provinciale di Cagliari - Assessorato Viabilità e Trasporti				
<b>OPERA</b>		Lavori di salvaguardia del litorale del Poetto e strada di collegamento				
<b>ANALISI PETROGRAFICA SABBIA - COMPOSIZIONE MODALE D'INSIEME</b>						
Campione	(2) 5		(2) 6		(2) 7	
Classe granul. modale (mm)	0.500-0.350		0.500-0.350		0.500-0.350	
	conta	per cento	conta	per cento	conta	per cento
Quarzo unitario e composto	83	29,2	57	21,3	85	30,0
Quarzo compos. microcrist.	2	0,7	2	0,7	2	0,7
Quarzo in F. Rocce Ignee	4	1,4	5	1,9	3	1,1
Quarzo in F.R. sedimentarie	0	0,0	1	0,4	0	0,0
K-Feldspato (con Microcl.)	47	16,5	29	10,9	44	15,5
K-F in Frammenti di Rocce	9	3,2	5	1,9	4	1,4
Plagioclasio / Feld. alterato	16	5,6	8	3,0	15	5,3
Plag. in Frammenti di Rocce	0	0,0	2	0,7	1	0,4
Semiscisto / Fillite / Slate	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Scisto a Quarzo e Mica ch.	2	0,7	2	0,7	0	0,0
Altri scisti di basso grado	1	0,4	2	0,7	1	0,4
Scisti di alto grado	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Porfiroide	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Tufite	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Felsifiro / Microgran. a Q-F	0	0,0	1	0,4	1	0,4
Riolite / Dacite	1	0,4	0	0,0	0	0,0
Trachite / Spilite	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Andesite / Basalto	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Ultramafite / Serpentinite	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Radiolarite / Diaspro	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Bioselce impura/calcolizzata	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Shale	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Siltite quarzo-feldspatica	0	0,0	1	0,4	0	0,0
Siltite litica / Calcsiltite	1	0,4	1	0,4	1	0,4
Alterite silicoclastica	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Alterite carbonatica	0	0,0	1	0,4	0	0,0
Laminite algale / Micrite pell.	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Biomcrite	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Biospatite - Biolitite	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Grainstone	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Calcarea cristallino	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Dolomia fine-medlocristall.	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Mica chiara / M. sc. / Clorite	0	0,0	0	0,0	2	0,7
Mica in Frammenti di Rocce	1	0,4	0	0,0	0	0,0
Pesante traspar / P. opaco	1	0,4	1	0,4	0	0,0
Grano autigeno piattaform.	1	0,4	1	0,4	1	0,4
Foraminifero	18	6,3	20	7,5	21	7,4
Detrito Gast./Lamel./Echin.	44	15,5	55	20,6	41	14,5
Detrito Alga incr./Briozoo	24	8,5	31	11,6	31	11,0
Detrito corallinaceo	29	10,2	42	15,7	30	10,6
<b>Totale</b>	<b>284</b>	<b>100,0</b>	<b>267</b>	<b>100,0</b>	<b>283</b>	<b>100,0</b>

PARMA 14.06.02	ANALISTA	RESPONSABILE DEL LABORATORIO
	Dott.ssa M. A. Calzolari	Prof. Renzo Valloni
	<i>Calzolari M. A.</i>	<i>Renzo Valloni</i>