

F20

ENEA

COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

**UN ESEMPIO
DI ANALISI ECOLOGICA
DEL SISTEMA MARINO-COSTIERO
DA CAPO CIRCEO
ALL'ISOLA DI ISCHIA**

ATTI DEL CONVEGNO ORGANIZZATO DALL'ENEA
AL CENTRO RICERCHE ENERGIA AMBIENTE
DI SANTA TERESA/LA SPEZIA

14 GIUGNO 1983

SERIE SIMPOSI

La distribuzione dei radionuclidi tra Capo Circeo e l'Isola d'Ischia

C. Papucci*, O. Lavarello*

Introduzione Dal maggio 1980 al giugno 1982 sono state condotte quattro campagne radioecologiche nell'area antistante la foce del fiume Garigliano (fig.1), lungo il quale a circa 10 km dalla foce è situata una centrale elettronucleare da 160 MWe, in esercizio dal 1964 al 1978.

Gli scopi principali dell'indagine sono stati essenzialmente:

- 1) determinare i livelli di radioattività ambientale negli ecosistemi fluviale e marino, come studio di base per la discriminazione degli apporti dovuti all'esercizio dell'impianto rispetto alla presenza di radionuclidi artificiali dovuti alle ricadute radioattive (fall-out);
- 2) individuare i principali processi ambientali che regolano la distribuzione del materiale terrigeno apportato e dei radionuclidi radioattivi ad esso associati.

La strategia di campionamento ha tenuto conto di tre fattori che determinano la presenza di radionuclidi nei sedimenti e nei materiali biologici: gli apporti dovuti agli scarichi della centrale, le ricadute delle esplosioni nucleari ed

* ENEA, Centro Ricerche Energia Ambiente Santa Teresa, La Spezia

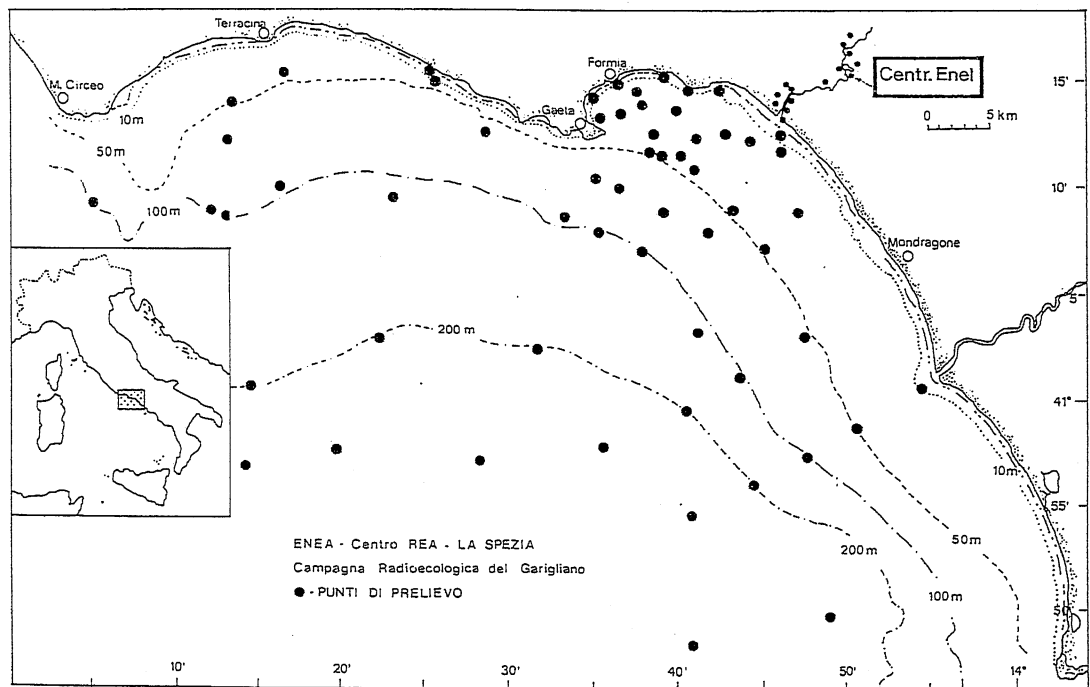
il dilavamento dei bacini imbriferi del Garigliano e del Volturno. L'area di campionamento per i rilievi della distribuzione dei radionuclidi va dal Monte Circeo all'Isola d'Ischia e dalla linea di riva alla batimetrica dei 500 m (circa 2500 km²), con un più intenso campionamento negli ambienti a minore energia idrodinamica, più soggetti ad accumulo dei radionuclidi.

Materiali e metodi

Sono stati prelevati 43 campioni di sedimenti superficiali e circa 120 campioni di pesci e molluschi cefalopodi, bivalvi, alghe, macrofite fluviali e fanerogame marine. I sistemi di prelievo, di pretrattamento e trattamento dei campioni sono standardizzati, e già descritti nei risultati di precedenti campagne (Anselmi et al., 1981).

Figura 1
Punti di prelievo

Le spettrometrie gamma sono state effettuate con rivelatori al Ge (Li) da 50 cm³, con efficienza del 15% e risolu-



zione 2 KeV. I campioni, misurati in media per 24 ore, sono spettrati con sistema LABEN a 2048 canali, analizzando un intervallo di energia compresa fra i 75 ed i 1900 KeV.

Dopo l'acquisizione, lo spettro è elaborato automaticamente per la ricerca dei picchi significativi ed il riconoscimento del nuclide associato. Per i nuclidi riconosciuti vengono espresse le concentrazioni e gli errori associati (2.5σ).

I campioni alluvionali di spiaggia e di piattaforma sono stati sottoposti ad analisi granulometrica e mineralogica. L'analisi granulometrica della frazione grossolana è stata effettuata mediante setacciatura, quella della frazione fine mediante l'idrofotometro ed il sedigrafo. L'analisi mineralogica della frazione pesante è stata effettuata mediante separazione gravimetrica e magnetica e successivi esami al microscopio ottico. La composizione mineralogica fondamentale (% di quarzo, % di Na e K feldspato e % di carbonati) e quella della frazione argillosa sono state determinate per via diffrattometrica.

Risultati

Ambiente marino

I radionuclidi artificiali gamma-emittitori rivelabili sistematicamente nell'ambiente marino considerato sono il ^{137}Cs ed il ^{60}Co .

Di questi, il ^{60}Co , per la sua origine locale e per la sua elevata capacità di essere rapidamente fissato nei sedimenti, può essere utilizzato come tracciante degli scarichi dovuti all'esercizio dell'impianto nucleare.

Sedimenti

La distribuzione dei due radionuclidi nei primi 2 cm di sedimento risulta essere in genere correlata alla granulometria e segue il destino sedimentario delle particelle silt-

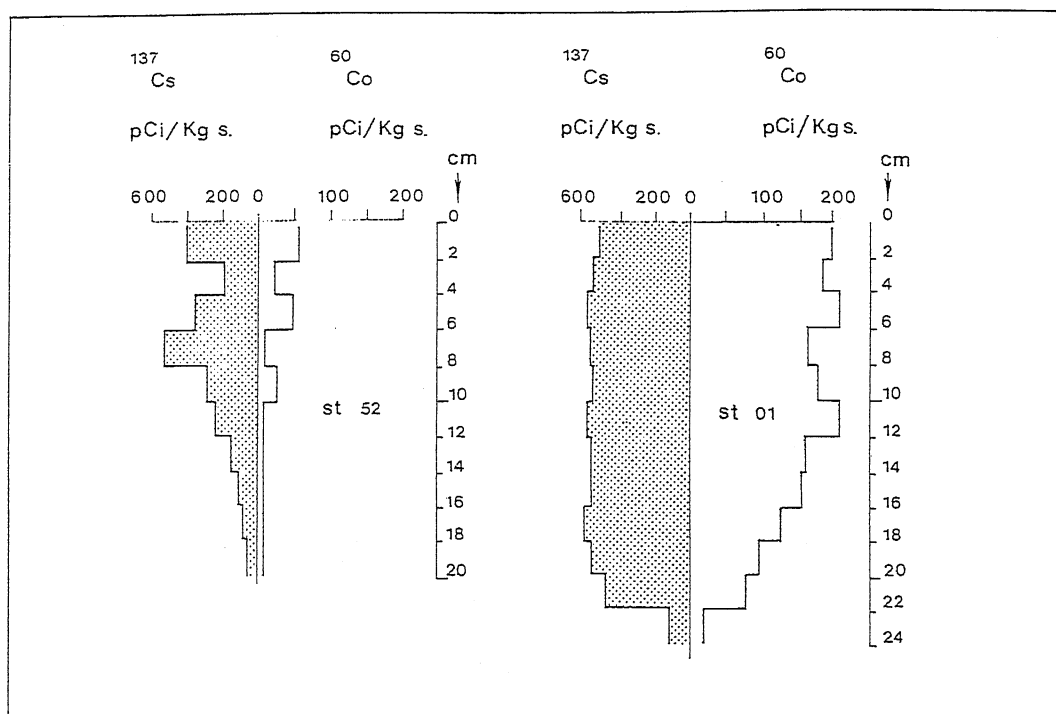


Figura 2 Distribuzione verticale di ^{137}Cs e ^{60}Co in carote indisturbate

argillose. I valori più bassi si riscontrano nelle zone a batimetria inferiore (10–20m), dove il maggior idrodinamismo favorisce la dispersione delle particelle più fini: mentre le maggiori concentrazioni di radionuclidi si rilevano nelle zone a ridotto idrodinamismo dell'area interna del Golfo di Gaeta e nell'asta terminale del fiume Garigliano, dove i sedimenti in sospensione esprimono la massima superficie di scambio.

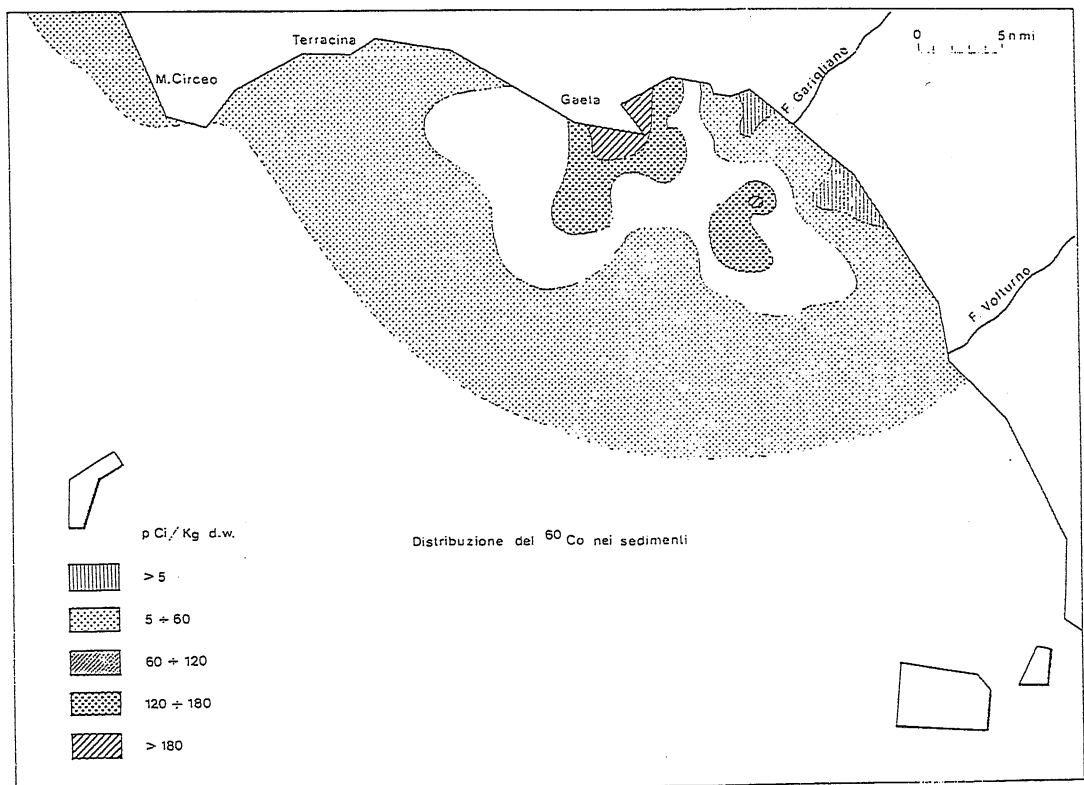
La distribuzione verticale dei radionuclidi nei sedimenti (fig. 2) interessa, a seconda delle zone, strati compresi tra la superficie ed i 12-22 cm di profondità. Ciò farebbe pensare ad una elevata velocità di sedimentazione nella zona in esame dove, però, sono anche presenti sia fenomeni chimico-fisici di rimobilizzazione dei radionuclidi, che bioturbazioni negli strati presi in esame, dovuti ad organismi fossori. Per quanto riguarda il ^{137}Cs andamenti simili

sono stati raccolti in altre zone delle coste italiane (La Spezia, La Maddalena, Latina: cf. Anselmi et al., 1983).

Complessivamente, la zona interessata dalla presenza di ^{60}Co supera i 1700 km^2 (fig. 3). L'attività totale di ^{60}Co , presente nei sedimenti dell'area in esame, tenendo conto della distribuzione verticale del nuclide, è stata stimata in $118,4 \text{ GBq}$ ($3,2 \text{ Ci}$) al settembre 1980. Questa attività rappresenta il 37% di quella scaricata. (ENEL, 1977) Il valore è in buon accordo con valutazioni effettuate per impianti analoghi ed in situazioni ambientali simili: es. 40% ad Oyster Creek (Olsen et al., 1980). Altri Autori, in situazioni completamente diverse, stimano valori sensibilmente differenti: 95% a Humbolt Bay (Heft et al., 1973), 90% a Perch Lake (Ophel et al., 1973), 9% a Chuck River (Pickering et al., 1966).

Figura 3
Distribuzione
del ^{60}Co nei
sedimenti

La distribuzione del ^{137}Cs nei sedimenti (fig. 4) ha un



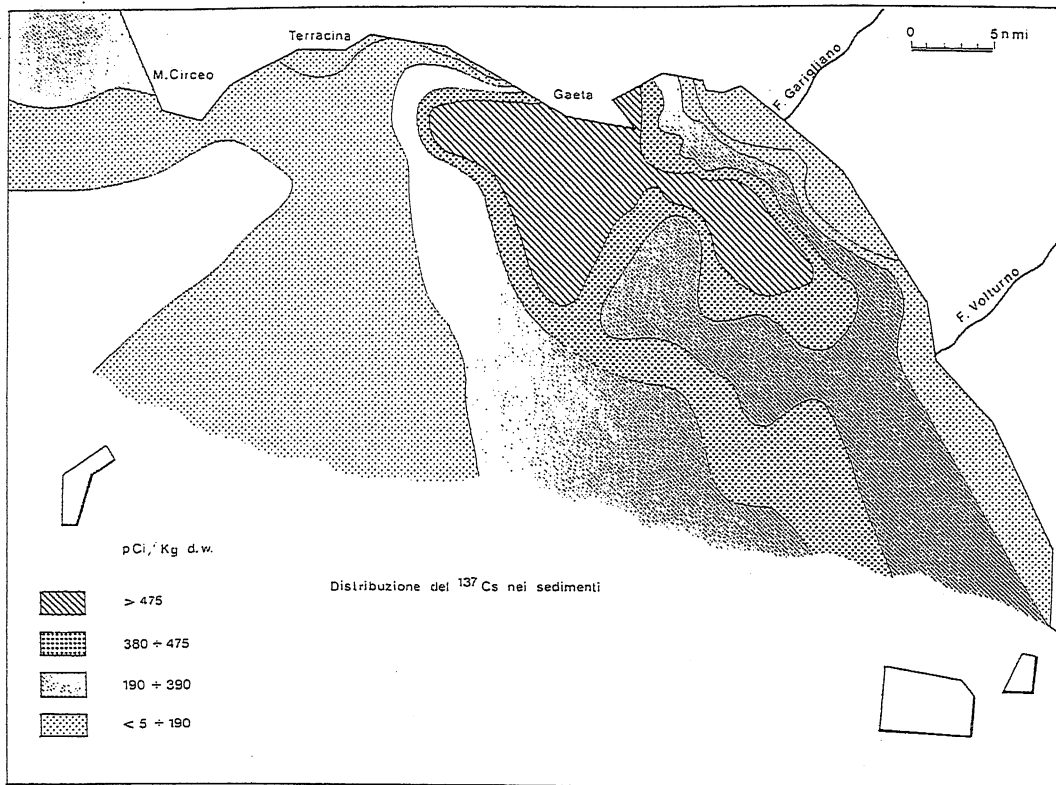


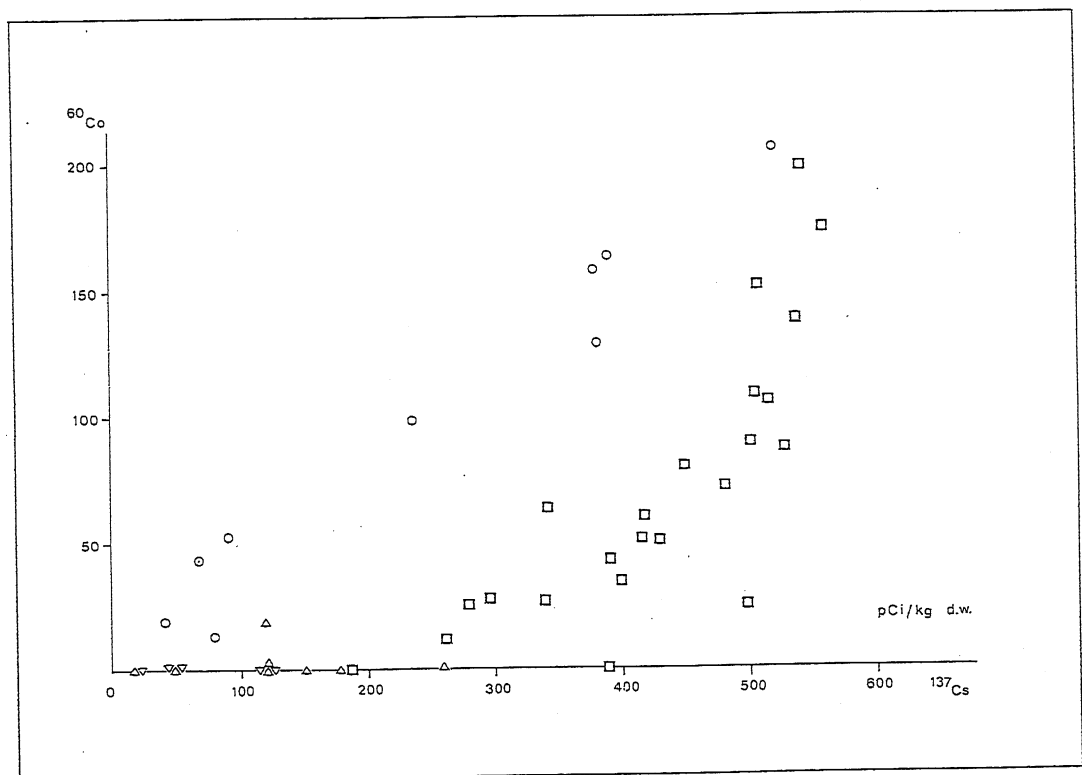
Figura 4 Distribuzione del ^{137}Cs nei sedimenti

andamento analogo e quello già esaminato per il ^{60}Co . Le attività misurate nei primi due centimetri di sedimento, nelle aree di maggiore concentrazione, corrispondono a circa 259 MBq/km^2 (7 mCi/km^2). Questo dato è confrontabile con quello stimato da Livingston et al., 1979 per vari punti del Mediterraneo, intorno a 122.1 MBq/km^2 ($3,3 \text{ mCi/km}^2$); da Noshkin, et al., 1973 per le Bocche di Bonifacio, intorno a $136,9 \text{ MBq/km}^2$ ($3,7 \text{ mCi/km}^2$); da Bruschi et al., 1980 nel sito di Latina, praticamente al confine Nord con la zona in esame, intorno a 148 MBq/km^2 (4 mCi/km^2). La similarità di questi dati, riferiti a vari punti del Mediterraneo aventi situazioni geomorfologiche molto diverse, risulta evidente anche in considerazione che il valore di 259 MBq/km^2 (7 mCi/km^2) negli strati superficiali dei sedimenti corrisponde al 5% della deposizione di ^{137}Cs da ricadute radioattive, espresse in mCi/km^2 , sul bacino del Mediterraneo (37 latitudine Nord,

dove si sono avuti 120 mCi/km² totali di ricadute, integrate e corrette per il decadimento al settembre 1980).

L'analisi del rapporto ⁶⁰Co/¹³⁷Cs evidenzia (fig. 5) tre gruppi di stazioni con caratteristiche differenti. Analizzando la dislocazione territoriale dei tre gruppi (fig. 6) si può osservare come il primo gruppo di stazioni corrisponda alla zona di diretta influenza degli apporti fluviali del Garigliano (zona compresa fra la foce del fiume e l'interno del Golfo di Gaeta); il secondo – compreso fra la foce del Volturno e l'esterno del promontorio di Gaeta, su stazioni più distali – è direttamente connesso con gli apporti di ¹³⁷Cs dovuti al dilavamento del bacino imbrifero del Volturno, che si sovrappongono ai contributi complessivi del Garigliano; il terzo gruppo di stazioni, situato nell'area antistante il Capo Circeo e caratterizzato da scarse attività di ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co, è connesso con granulometrie grossolane di natura prevalentemente carbonatica.

Figura 5 Rapporto ⁶⁰Co/¹³⁷Cs nei sedimenti



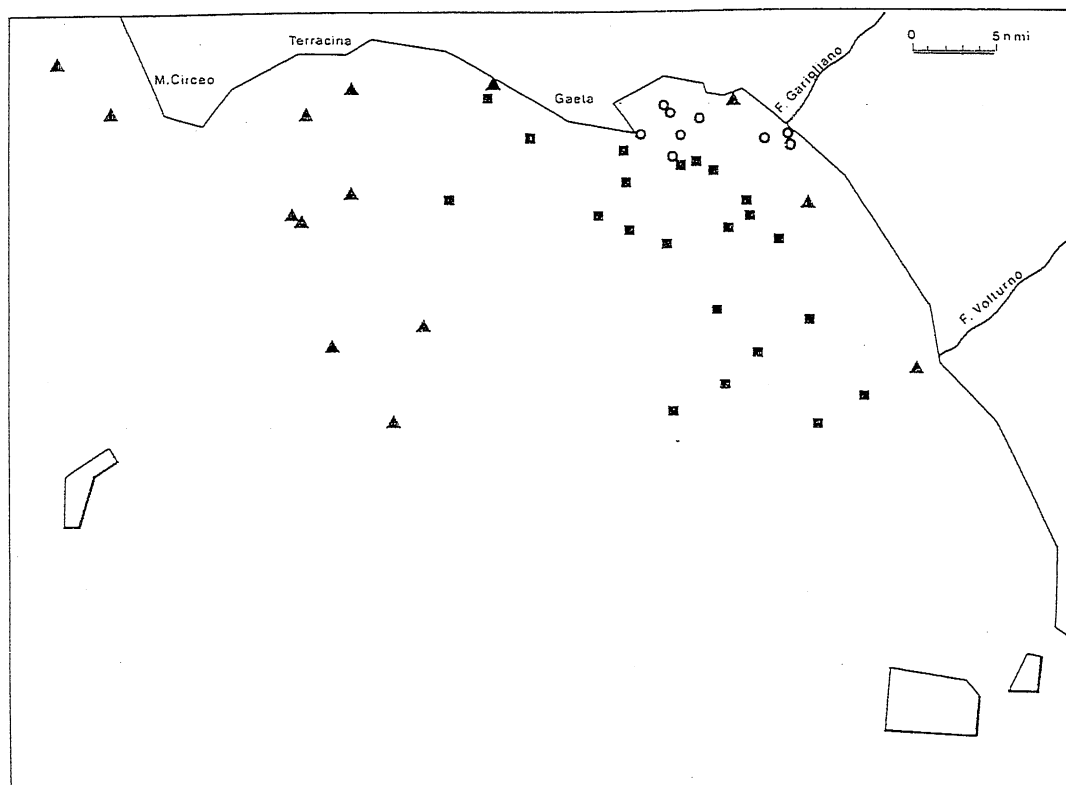


Figura 6
Dislocazione
territoriale
del rapporto
 $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$

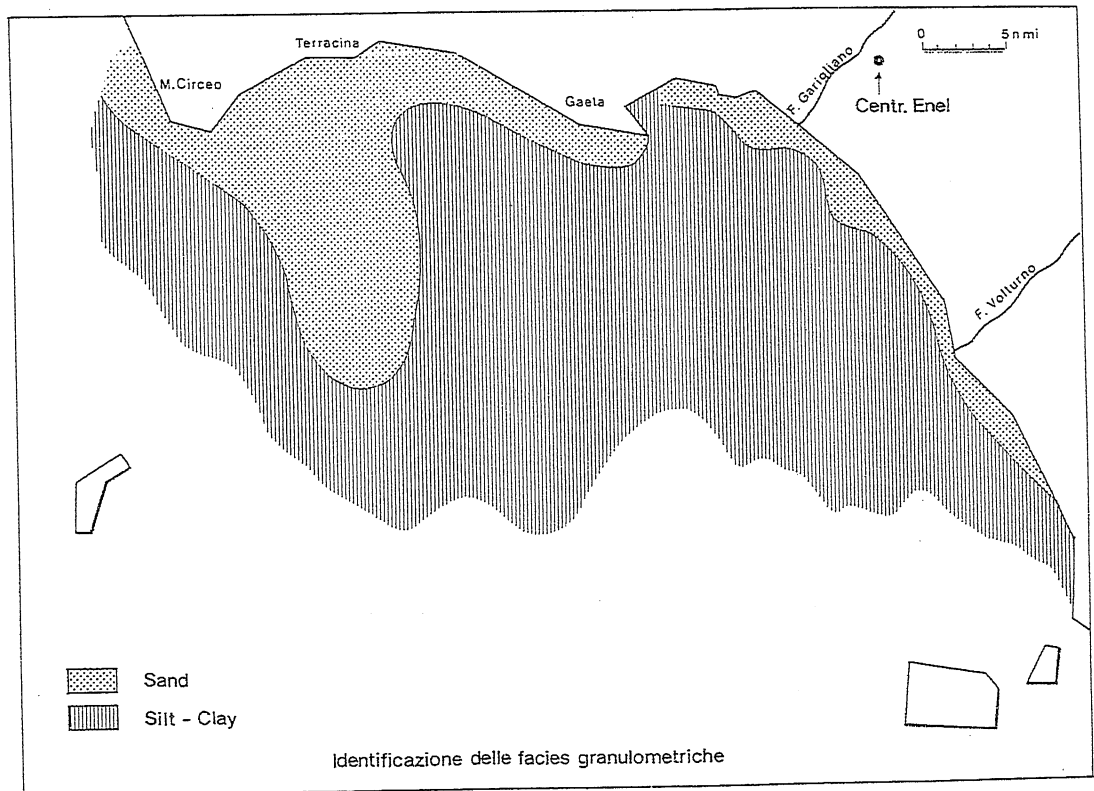
Complessivamente questa distribuzione conferma la elevata affinità dei radionuclidi con le particelle siltose ed argillose. La diversità fra i tre gruppi è stata spiegata, (Pappucci, Damiani, Zurlini, 1983) infatti, anche con metodi di analisi multivariata discriminante volti a definire le variabili chimico-fisiche maggiormente responsabili delle differenziazioni che esistono nella distribuzione dei radionuclidi (fig. 7): le dislocazioni spaziali delle facies granulometriche e dei tre gruppi di stazioni considerate hanno lo stesso andamento.

Questo quadro distributivo è correlato con i fattori idrodinamici dell'area: le correnti, entro la batimetrica dei 100 m, hanno generalmente un movimento, a larga scala, con direzione preferenziale SE-NO; a cui è sovrapposto un movimento inerziale che, al largo, può portare ad una componente significativa diretta contro la costa (fig. 8 e fig. 9).

A batimetrie più basse, inferiori a 50 m, la componente contro costa decresce, per effetti di canalizzazione del fondo e per quelli dovuti a gradienti di densità. Le variazioni di densità dovute all'influenza fluviale aumentano la componente della velocità parallela alla costa ed inibiscono la prevalenza di altre componenti originate in aree adiacenti. Le velocità delle correnti nella fascia costiera, com'era da attendersi, tendono a diminuire man mano che ci si avvicina alla linea di costa ed al fondo. Nella zona interna del Golfo di Gaeta, in conseguenza del notevole rallentamento della corrente di fondo, sono esaltati i movimenti inerziali, che favoriscono la stabilità dei sedimenti. I radionuclidi associati ai sedimenti di questa area tendono ad avere, quindi, scarsa mobilità.

Figura 7
Identificazione
delle facies
granulometriche

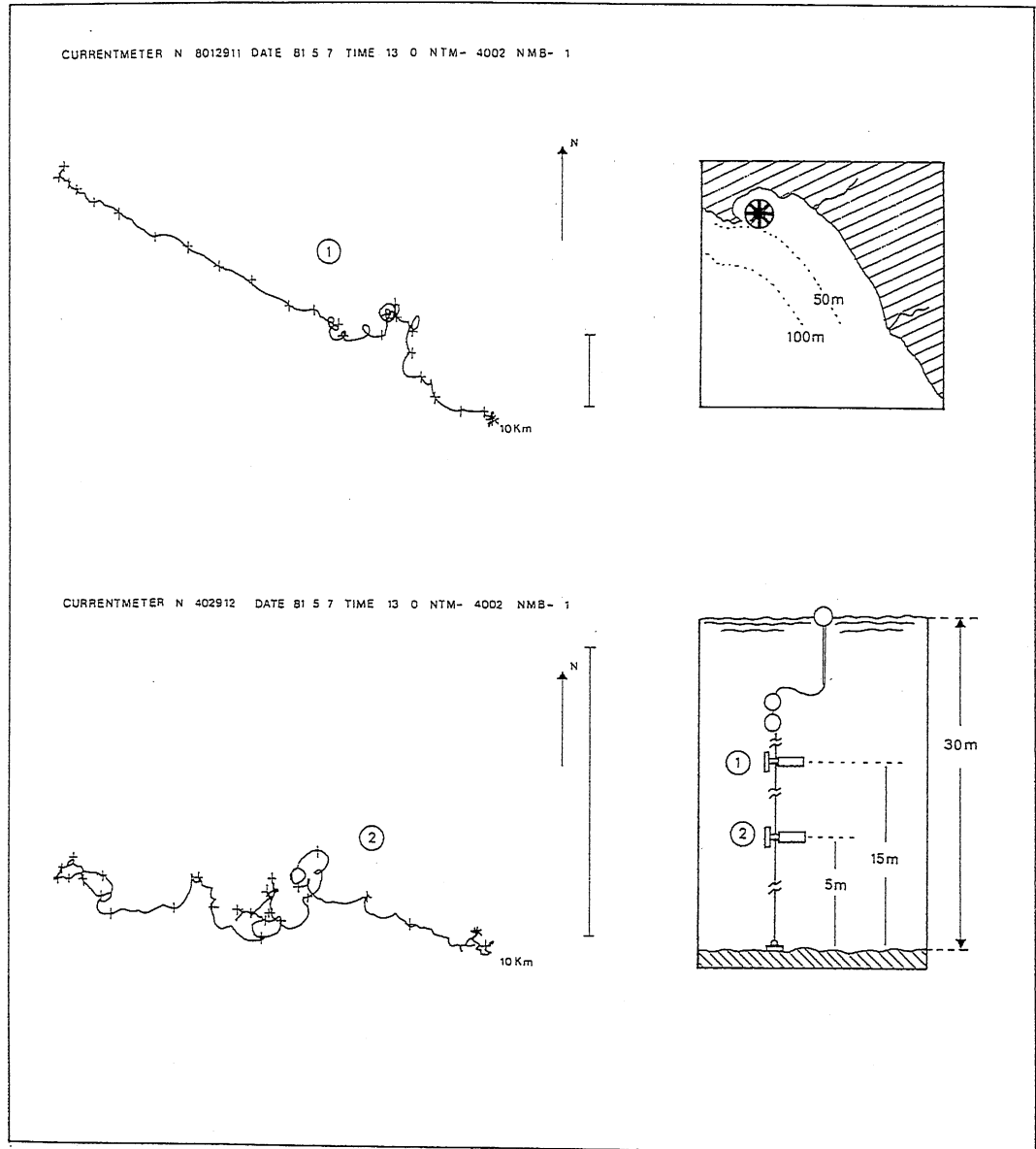
Risultati preliminari sulla distribuzione spaziale della salinità superficiale confermano questo andamento: le acque



del Garigliano e del Volturno tracciano l'acqua di mare della zona con un tipico andamento SE-NO (fig. 10).

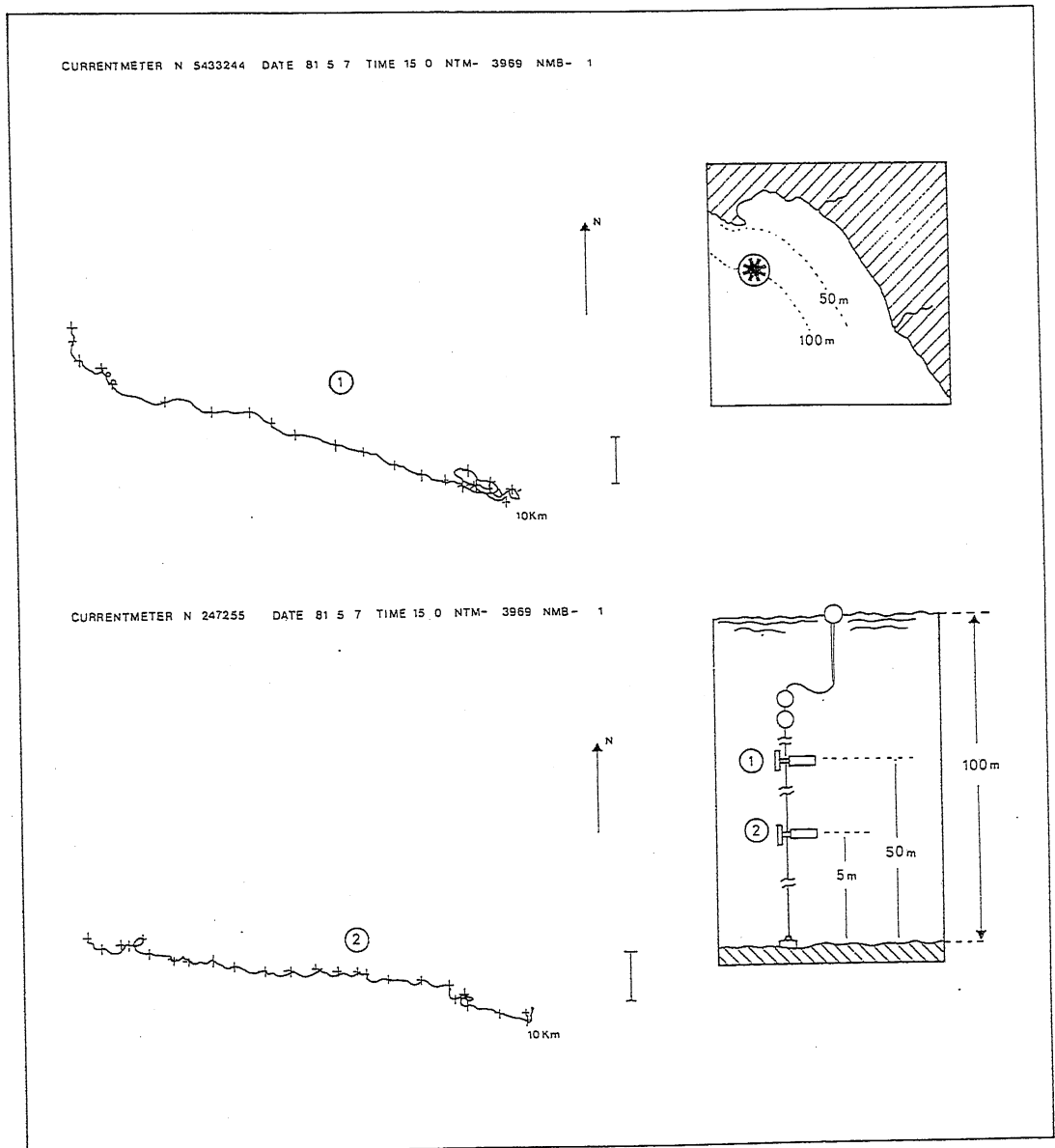
Figura 8
Diagramma
progressivo
vettoriale delle
correnti

I risultati della caratterizzazione mineralogica dei sedimenti fluviali e della piattaforma costiera indicano, anch'essi, lo stesso andamento distributivo, in termini di direzione preferenziale del trasporto dei sedimenti. A



questo scopo sono state esaminate le frazioni sabbiose ed argillose dei sedimenti fluviali del Volturno e del Gargliano e dei sedimenti di piattaforma compresa fra Capo Miseno ed il promontorio del Circeo. Per quanto riguarda la frazione sabbiosa, i minerali pesanti sono stati usati come traccianti naturali per caratterizzare i diversi apporti fluviali. La frazione sabbiosa dei sedimenti dei

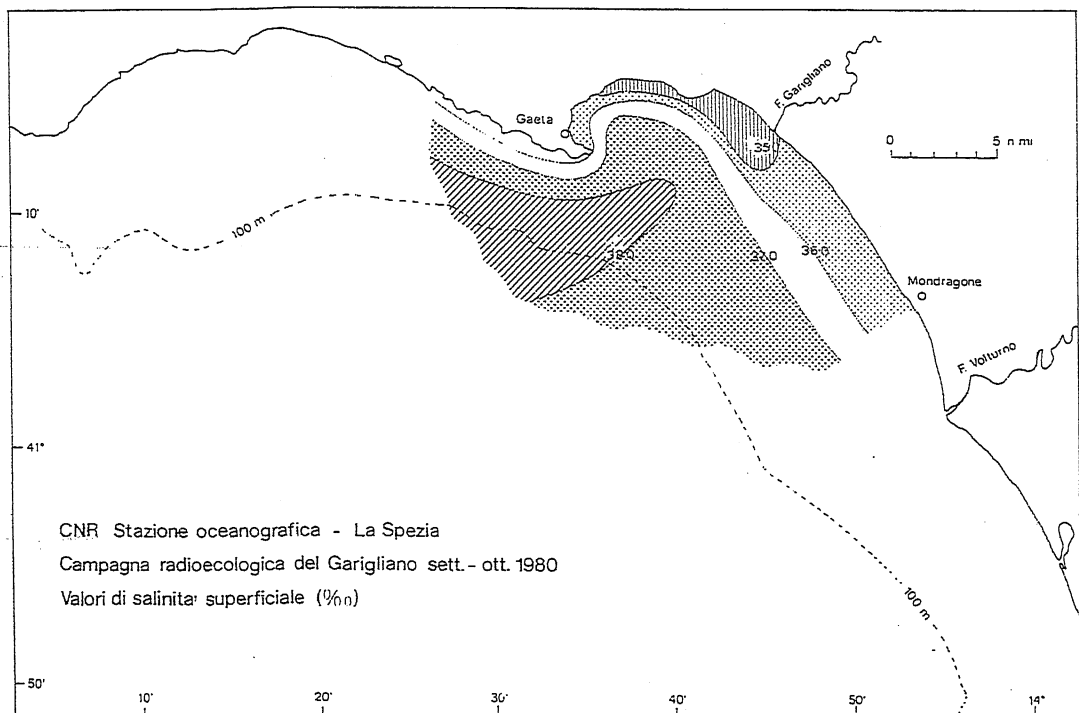
Figura 9
Diagramma
progressivo
vettoriale delle
correnti



due fiumi risulta differente, data la diversa composizione litologica dei rispettivi bacini. Il bacino del Volturno, interessato da formazioni vulcaniche, presenta una associazione di minerali pesanti a prevalenza di pirosseni, magnetite, granati scuri e titanite; i sedimenti del Garigliano derivano sia da formazioni vulcaniche (lato sinistro del bacino), che sedimentarie di tipo arenaceo argilloso, e presentano una associazione costituita – in ordine di abbondanza – da magnetite, pirosseno, titanite e granato rosso.

Se si esamina la distribuzione dei minerali pesanti nei sedimenti di piattaforma è possibile individuare le aree di influenza dei due fiumi, e tracciare le direzioni principali di trasporto dei sedimenti più grossolani (fig. 11). Per quanto riguarda la frazione argillosa, che rappresenta la parte dei sedimenti trasportati in sospensione e depositati sulla piattaforma alle batimetrie più profonde, le associazioni dei minerali argillosi di origine alluvionale dei due fiumi risultano leggermente differenziate (diversa compo-

Figura 10
Valori di
salinità
superficie (‰)



di Gaeta e si estendono più lontano verso il promontorio del Circeo.

Il complesso di tutti questi risultati, correlati con la distribuzione spaziale dei radionuclidi nei sedimenti, suggeriscono che le aree maggiormente interessate alla loro deposizione ed a fenomeni di accumulo sono quelle a ridotto idrodinamismo interne al Golfo di Gaeta e lungo l'asta terminale del Garigliano. Le aree rivestono quindi un maggiore interesse di studio dal punto di vista radioecologico.

Organismi marini

I bivalvi (mitili, telline) sono, fra gli organismi marini eduli, quelli che mostrano le relative più elevate attività di ^{60}Co (0,37–5,55 Bq/kg fresco nelle parti molli). L'attività di pesca delle telline è particolarmente intensa nella zona della foce del Garigliano.

Le attività di ^{60}Co nei pesci vanno, da un massimo di 3,7 Bq/kg fresco (100 pCi/kg fresco) in *Gobius sp.*, *Mullus surmuletus* e *Solea solea*, a qualche decimo di Bq/kg fresco. Le attività di ^{137}Cs nei pesci sono generalmente comparabili a quelle relative alle stesse specie prelevate lungo le coste italiane con un massimo di 0,26 Bq/kg fresco (6,9 pCi/kg fresco) in *Mullus barbatus* e *Serranus sp.* (dati inediti)

I risultati confermano inoltre il ruolo di trattenimento svolto dalle praterie di posidonie nei processi deposizionali del materiale sottile. Infatti le attività sono più elevate nei rizomi (1,85 Bq/kg fresco di ^{60}Co , 0,74 Bq/kg fresco di ^{137}Cs) rispetto alle foglie, dove questi valori sono dimezzati.

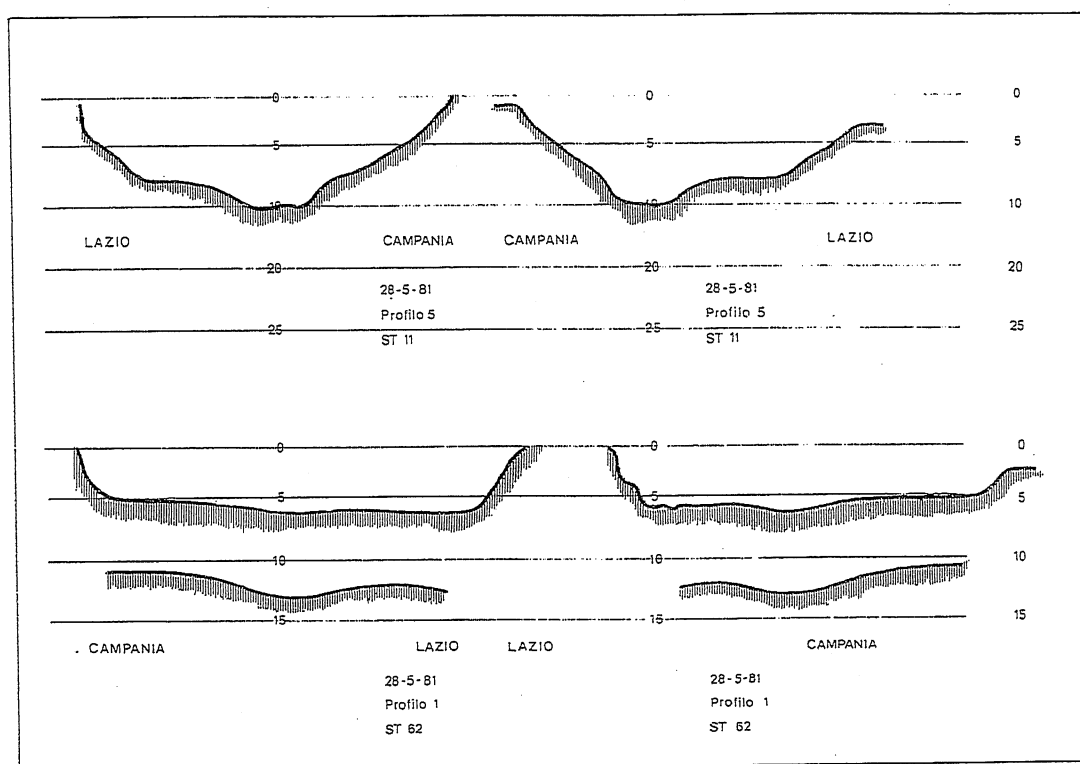
Ambiente fluviale

L'ambiente fluviale preso in considerazione (ultimi 20 km) è caratterizzato da una notevole portata in ogni stagione (circa 120 m³/sec.) e non sono infrequenti piene, anche di una certa rilevanza, nei mesi autunnali ed invernali. Nel tratto considerato, la ridotta sezione dell'alveo determina una elevata velocità della corrente, con l'eccezione degli ultimi due chilometri, dove un sostanziale aumento della sezione provoca un ridotto idrodinamismo che favorisce la deposizione delle particelle più sottili e quindi l'accumulo dei radionuclidi (fig. 12).

Figura 12
Garigliano:
sezione
dell'alveo a
7 km (in alto) e
1 km (in basso)
dalla foce

Questo tratto dell'ambiente fluviale è stato studiato dall'ENEA fin dal 1970 (Antonelli et al., 1970, 1971).

Nella fig. 13 sono riportati i risultati delle determinazioni di ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co nei sedimenti: i valori più elevati si riscon-



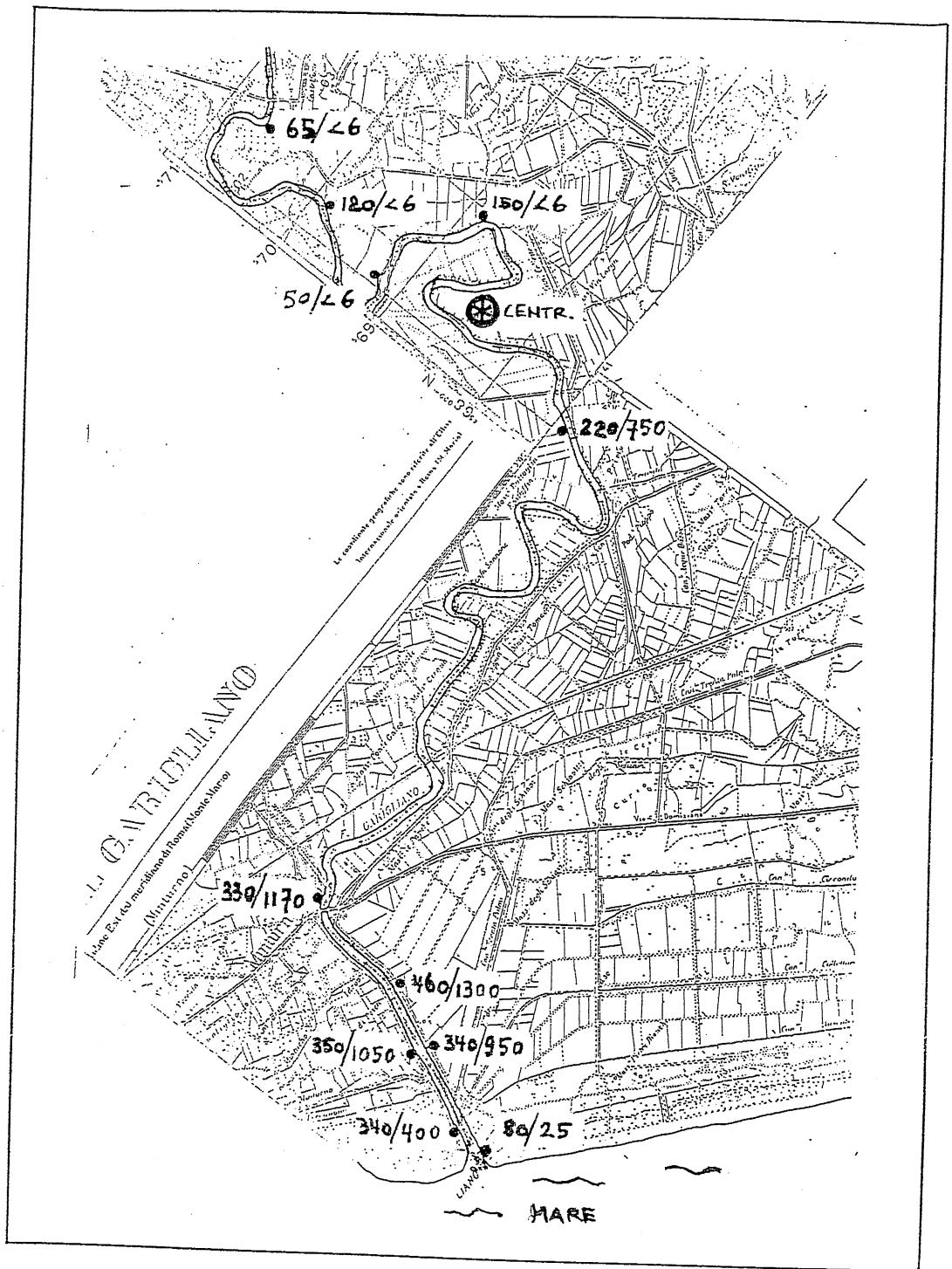


Figura 13 Attività di ^{137}Cs e ^{60}Co nei sedimenti fluviali

trano nell'asta terminale, in relazione all'accentuarsi dei meccanismi depositivi e degli effetti di intrappolamento delle particelle più fini da parte della vegetazione che cresce abbondante sulle sponde.

Le attività di ^{60}Co relativamente più elevate, riscontrate in questa zona sono probabilmente legate ai processi ambientali che regolano l'associazione Co/ossidi idrati di Mn (Boniforti, 1983; Means, 1978) e quelli specifici relativi al comportamento degli ossidi di Mn in ambienti con interfaccia fiume/mare. L'andamento del rapporto fra ^{137}Cs e ^{60}Co nei sedimenti è pari a 0,3 in situazioni tipicamente fluviali, e di 3,0-3,5 nell'ambiente marino, con una zona di transizione (ultimi 500 m del Garigliano) dove la influenza del mare condiziona il comportamento chimico-fisico dei radionuclidi (fig. 13).

Non è stato fin'ora possibile effettuare una stima dell'attività totale di ^{60}Co presente nel fiume, ma le attività - praticamente costanti - di questo radionuclide in campioni di sedimento fluviale prelevati con frequenza semestrale dal 1978 ad oggi, fanno presumere una scarsa mobilità del letto, almeno nella parte terminale del fiume (dati inediti).

L'elevata mobilità del ^{60}Co nell'ambiente marino (l'areale coperto arriva fin oltre il promontorio del Circeo) può essere spiegata dal fatto che il fiume Garigliano ha concentrazioni di Mn stabile, sia nel particellato sospeso che nei sedimenti, relativamente modesti (inferiori, p.e., a quelli del Volturno: Boniforti, 1983). L'ipotesi plausibile è che il ^{60}Co rilasciato dalla centrale immesso in acque povere di particelle di ossidi idrati di Mn, con le quali ha una elevata affinità, si depositi nei sedimenti non soltanto nel primo fronte deposizionale di queste particelle, ma su un'area più grande, man mano che esso trova nuove particelle con cui legarsi e sedimentare, seguendo probabilmente l'idrodinamismo della zona.

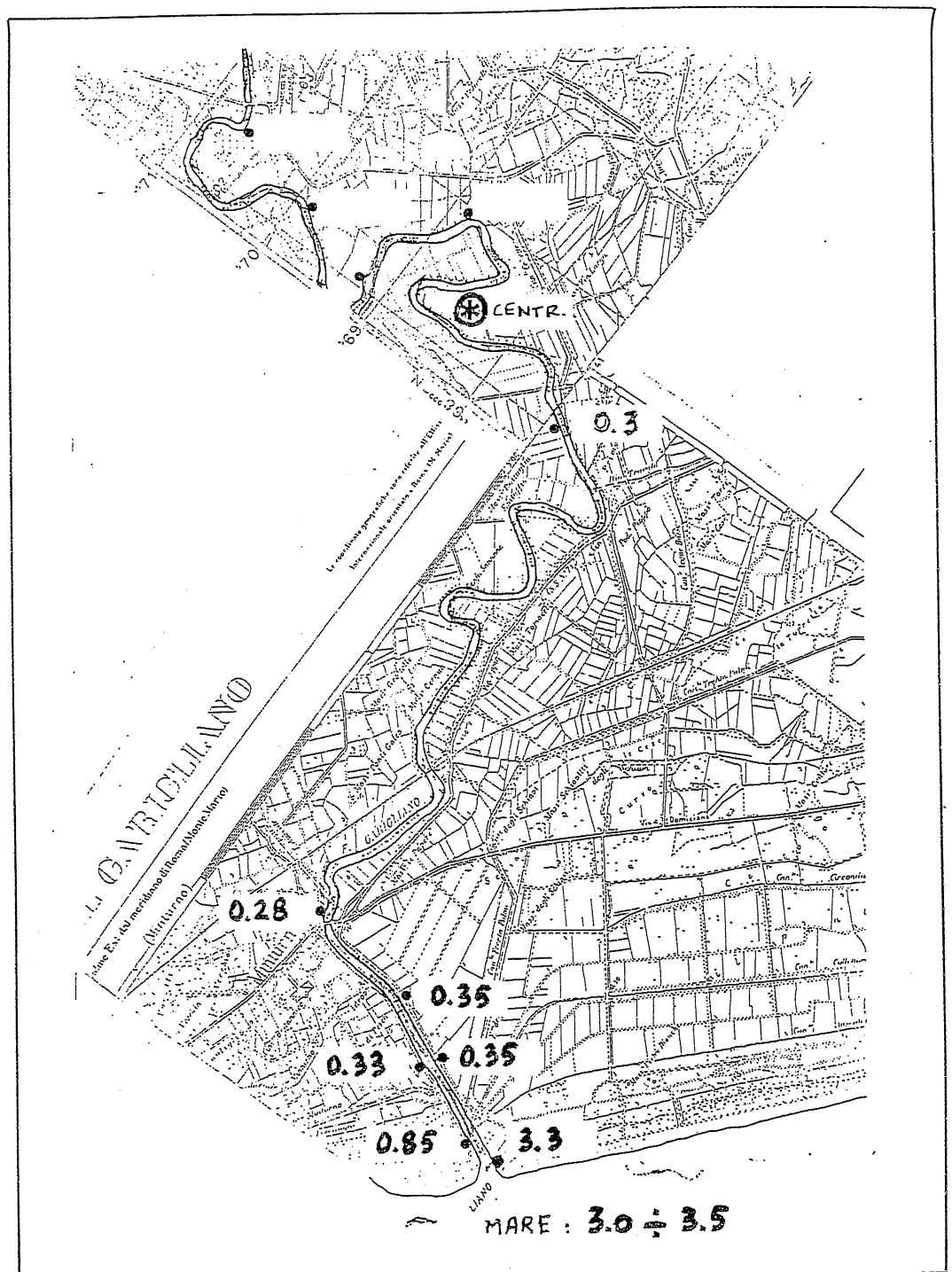


Figura 14 Rapporto $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ nei sedimenti fluviali

Conclusioni Nell'ambiente marino considerato la radioattività ambientale artificiale direttamente correlabile all'esercizio dell'impianto elettronucleare appare distribuita su un'area di almeno 1700 km²; tale radioattività è a livelli così bassi da non presentare alcuna rilevanza dal punto di vista sanitario e ambientale. Le zone di relativa maggiore deposizione dei radionuclidi sono essenzialmente quelle dove il bilancio sedimentazione/erosione è a favore del deposito (Golfo di Gaeta, batimetrie fra i 40 ed i 70 m davanti alla foce del Garigliano, asta terminale del Garigliano). La distribuzione dei radionuclidi nei sedimenti marini dell'ambiente subcostiero è in genere correlabile con quella dei materiali fini.

Nell'ambiente fluviale i radionuclidi presentano le maggiori attività relative nella parte terminale del fiume, dove le particelle solide sospese tendono a depositarsi per il ridotto idrodinamismo.

Le azioni dinamiche esercitate dal moto ondoso e dalle correnti litoranee determinano lo smistamento differenziale delle particelle terrigene grossolane nella fascia adiacente al litorale e di quelle fini in quella immediatamente verso il mare; in corrispondenza delle foci fluviali a forte apporto sedimentario la fascia a granulometria grossolana si espande fortemente in mare, allontanando dalla linea di costa le fasce batimetriche maggiormente interessate dalla deposizione di radionuclidi.

In ambito costiero i potenziali livelli di relativa maggiore concentrazione dei contaminanti - radioattivi e no - di provenienza terrigena corrispondono al primo fronte deposizionale delle particelle che li trasportano; ciò si verifica, per quanto sopra indicato, nella prima zona il cui fondo non sia soggetto al dinamismo del moto ondoso, quindi ad una certa profondità ed ad una certa distanza da riva.

A partire dalla fascia di maggiore accumulo le concentrazioni dei contaminanti terrigeni subiscono una progressiva diminuzione verso il largo per l'effetto di diluizione cui vanno sottoposti i sedimenti terrigeni in conseguenza

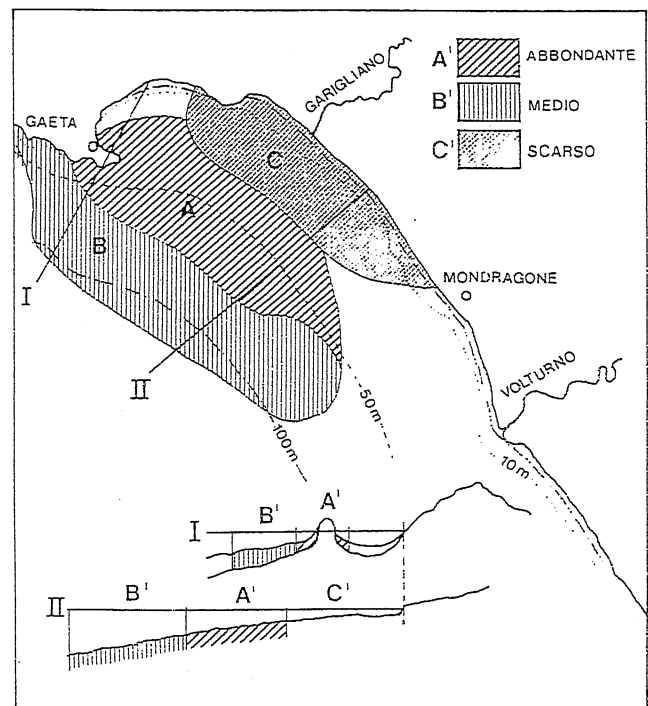
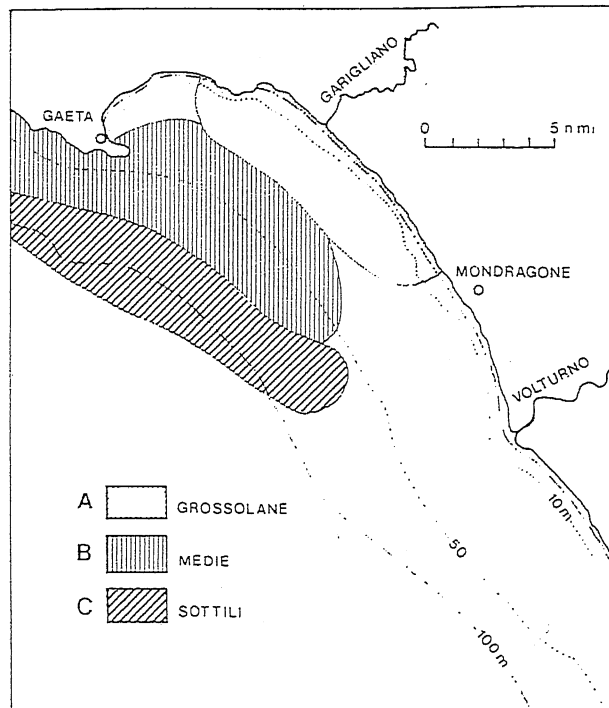


Figura 15
 Confronto fra
 la distribuzione
 delle dimensioni
 granulometriche
 e attività dei
 radionuclidi nei
 sedimenti

della miscelazione con i sedimenti pelagici autigeni, che mostrano più basse attività di radionuclidi.

Per l'influenza della morfologia costiera, che condiziona la distribuzione delle granulometrie fini, le posizioni dei valori più elevati di concentrazione dei radionuclidi sono vicine a riva nel caso di coste alte e più lontane da riva nel caso di coste basse (fig. 15). I fenomeni distributivi sono infatti correlati con l'ampiezza della zona in cui il fondo risente dell'azione del moto ondoso, che è massima in corrispondenza di apparati deltizi sommersi, media di fronte a coste basse e minima di fronte a coste alte.

La conoscenza del quadro geomorfologico e sedimentologico locale, anche a semplice livello previsionale, consente dunque di programmare razionalmente interventi di studio con la raccolta di un numero limitato di campioni significativi, distribuiti secondo criteri corrispondenti alla fisiografia del sistema ambientale esaminato e non secondo schemi geometrici.

Bibliografia

ANSELMI, B., BENVIGNU, F., BRONDI, A., FERRETTI, O., 1979 - *Studi su parametri biologici rilevanti al fine della contaminazione ambientale del territorio nazionale CNEN RT/PROT (79) 14.*

ANSELMI, B., FERRETTI, O., PAPUCCI, C., 1981 - *Studio preliminare dei sedimenti della piattaforma costiera della zona della foce del Garigliano.* Rendiconti Soc. Ital. di Miner. e Petrografia, 38 (1): pp. 367-384.

ANSELMI, B., BRONDI, A., FERRETTI, O., PAPUCCI, C., 1983 - *Connessioni tra geomorfologia costiera, granulometria dei sedimenti e distribuzione di radionuclidi in zone marine subocostiere.* Annali di Radioprotezione, 1982, pp. 109-129.

ANTONELLI, A., CASTALDO, M., CIGNA ROSSI, L., LANERI, U., PAGNOTTA, R., 1970 - *Primi risultati di un'indagine radioecologica sul fiume Garigliano.* Atti del XVI congresso Nazionale Associazione Italiana di Fisica Sanitaria e di Protezione contro le radiazioni. Firenze 24-25-26 settembre 1970.

ANTONELLI, A., CASTALDO, N., CIGNA ROSSI, L., LANERI, U., PAGNOTTA, R., 1971 - *Determinazione dei fattori di concentrazione in componenti abiotici e biologici del fiume Garigliano in Proceedings of the International Symposium on Radioecology Applied to the Protection of man and his Environment.* Rome, 7-10 September 1971.

ENEL, 1977 (e aggiornamenti) - *Informazioni relative alla richiesta di revisione delle prescrizioni tecniche per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi della centrale del Garigliano.*

- BONIFORTI, R., 1983 – *Metalli in traccia in acque, particellato e sedimenti*. Questa pubblicazione, 1983.
- BRONDI, A., FERRETTI, O., PAPUCCI, C., 1983 – *Influenza dei fattori geomorfologici sulla distribuzione dei radionuclidi. Un esempio: dal M. Circeo al Volturno*. Convegno italo-francese di radioprotezione, Firenze 30.5-1.6.83.
- BRUSCHI, A., LAVARELLO, O., PAPUCCI, C., RASO, G., RICCOMINI, M., SGORBINI, S., ZURLINI, G., 1980 – *Distribuzione dei radionuclidi nell'ambiente marino antistante la centrale di Latina*. Atti del Simposio sulle Metodologie Radiometriche e Radiochimiche nella Radioprotezione, Pavia, Pavia, 1980, pp. 127-134.
- HEFT, R.E., PHILLIPS, W.A., RALSTON, H.R., STEELE, W.A., 1973 – *Radionuclide transport studies in the Humbolt Bay marine environment*. Proc. Symp. Seattle, 1973 – IAEA, Vienna (1973), pp. 595.
- IAEA. Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters. Proc. Symp. IAEA; Vienna, pp. 57.
- LIVINGSTON, H.G., CASSO, S.A., BOWEN, V.T., BURKE, J.C., 1979 – *Soluble and particle-associated fall-out radionuclides in the Mediterranean water and sediments*. Rapp. Comm. Int. MÉR. Médit., 25/26 (5) pp. 71-74.
- MEANS, J.L., CRERAR, D.A., BORCSIK, M.P., 1978 – *Adsorption of Co and selected actinides by Mn and Fe oxides in soils and sediments*. Geoch. et Cosmoch. Acta, 1978, 42, 1763-1773.
- NOSHKIN, V.E., BOWEN, V.T., 1973 – *Concentration and distribution of long-lived fall-out in open ocean sediments*. In: "Radioactive Contamination of the Marine Environment". Proc. Symp. Seattle, 1973, IAEA/SM158/54: pp. 671-686.
- OLSEN, C.R., BISCAYE, P.E., SIMPSON, H.J., TRIER, R.M., KOSTYK, N., BOPP, R.F., LI, Y.H., 1980 – *Reactor-released and fine-grained sediment transport and accumulation patterns in Barnegat Bay, New Jersey and adjacent shelf waters*. Est. Coast. Mar. Sci., 10, pp. 119-142.
- OPHEL, I.L., FRASER, C.D., 1973 – *The fate of cobalt-60 in natural freshwater ecosystem*. USAEC. Radionuclides in Ecosystems (Nelson, D.J., Ed.), USAEC CONF. 710501.
- PAPUCCI, DAMIANI, ZURLINI, 1983. – *Indagine sui meccanismi che regolano la distribuzione di ^{60}Co e ^{137}Cs nei sedimenti dell'ambiente costiero antistante la centrale del Garigliano*. Atti del XXIII Congr. Naz. dell'AIRP, Capri 5-8 ottobre 1983.
- PICKERING, R.J., CARRIGAN, P.H., JR., TAMURA, T., ABEE, H.H., BEVERAGE, J.W., ANDREW, R.W. Jr., 1966 – *Radioactivity in bottom sediments of the Clich and Tennessee rivers*.
- SUNDBY, B., 1977 – *Manganese-rich particulate matter in a coastal marine environment*. Nature, 1977, 270, 417-419.