

METODOLOGIE DI GEOSTATISTICA APPLICATE ALLA STIMA DELLE VOLUMETRIE DI SEDIMENTO CONTAMINATO NEL PORTO DI TARANTO

Carlo INNOCENTI (*), Andrea SALMERI (*), Alessandro NAVACH (*), Francesca GIAIME (*)

(*) ICRAM – Istituto Centrale per la Ricerca scientifica e tecnologica Applicata al Mare, via di Casalotti 300 – 00166 Roma, tel: +39 06615701, fax: +39 0661561906, e-mail: gruppononifiche@icram.org

Riassunto

In questo articolo vengono descritte diverse metodologie di analisi geostatistica applicate al problema della gestione di sedimenti contaminati. Verrà evidenziato come tali tecniche possano essere utilizzate per affrontare problemi complessi come la gestione dell'incertezza, la stima di grandezze in uno spazio tridimensionale e l'analisi multivariata di variabili correlate fra loro.

Abstract

In this study are described several geostatistical methodologies that can be applied to the contaminated sediment problem. It will be explained how they can be used to resolve problem of uncertain assessment, variable estimation in a three-dimensional space and multivariate analysis.

Introduzione

Nell'ambito dell'Accordo Quadro tra l'ICRAM e l'Autorità Portuale di Taranto, l'Autorità Portuale ha affidato all'ICRAM l'incarico di supporto per la progettazione e lo svolgimento delle attività di caratterizzazione ambientale di alcune aree del porto da sottoporre ad interventi di escavo e di banchinamento ed alla realizzazione di una vasca di colmata.

Tutta l'area del porto è inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Taranto (l. 426/98) e qualsiasi intervento che interessi i sedimenti portuali deve essere preceduto da una caratterizzazione dettagliata che permetta di valutare lo stato di qualità dei fondali in esame e, ove necessario, predisporre un adeguato progetto di bonifica.

La caratterizzazione ha riguardato due settori del porto di Taranto: l'area del IV sporgente, interessata da lavori di escavo e banchinamento, (473450 m², 180 stazioni di campionamento) e l'area ad ovest di punta Rondinella, interessata dalla realizzazione di una vasca di contenimento per i sedimenti di dragaggio (282650 m², 120 stazioni di campionamento).

Nelle aree caratterizzate è stato individuato uno spessore di sedimento recente delimitato inferiormente da uno strato di argilla azzurra pleistocenica non interessata da fenomeni di contaminazione e che può, quindi, essere escluso dalle operazioni di bonifica. Il tetto dello strato di argilla ha assunto quindi un'importanza strategica, sia per i suoi aspetti di salvaguardia ambientale che per quelli dell'economia dell'opera. In questo contesto è risultato necessario, non solo effettuare una corretta stima dello spessore di sedimento recente, ma anche calcolare il grado di affidabilità della stima ed i relativi intervalli di confidenza.

Utilizzando la simulazione gaussiana sequenziale condizionale è stato possibile calcolare, in ogni punto dell'area di indagine, sia il valore più probabile dello spessore dello strato di sedimentazione recente, che un valore più conservativo, avente una probabilità inferiore al 10% di essere minore di

quello dello spessore reale non noto. Utilizzando questi due campi di valori è stata valutata la convenienza delle due possibili ipotesi di intervento: approfondire le indagini geofisiche per ridurre l'incertezza nella stima dello spessore di sedimento recente, mirando a sottoporre a bonifica solo il quantitativo strettamente necessario; non effettuare ulteriori indagini utilizzando il valore più conservativo per lo spessore a sedimentazione recente, sottoponendo così un volume maggiore di sedimento a bonifica.

Una volta delimitato e discretizzato con un'opportuna griglia tridimensionale il volume di indagine, sono state effettuate le stime delle frazioni granulometriche e delle concentrazioni del set di contaminanti più preoccupanti, necessarie per la selezione delle porzioni di sedimento da destinare alle diverse gestioni (cassa di colmata e trattamento/discarica).

Per la stima delle concentrazioni dei diversi analiti è stata utilizzata la metodologia del *block kriging* che permette di stimare la concentrazione media di ogni cella della griglia invece della sola concentrazione puntuale nel suo baricentro.

Le stime delle percentuali delle frazioni granulometriche ghiaia ($\emptyset > 2$ mm), sabbia ($0.063 \text{ mm} < \emptyset < 2$ mm) e pelite ($\emptyset < 0.063$ mm) devono rispettare alcuni vincoli di congruenza con la realtà fisica della misura: in ogni punto la somma dei valori delle tre stime deve dare come risultato il 100%. Per rispettare tale vincolo è stata utilizzata una metodologia di stima multivariata nota come *co-kriging* che permette di stimare contemporaneamente le tre frazioni rispettando il vincolo imposto (Da Silva et al., 2000). Anche tali stime sono state calcolate sul volume delle celle della griglia: si può quindi parlare di *block co-kriging*.

Una volta ottenute le stime sopraindicate è stato possibile, all'interno del volume di materiale di sedimentazione recente, procedere alla selezione delle volumetrie da inviare alle diverse gestioni, in funzione delle concentrazioni dei diversi analiti e della granulometria.

Stima della profondità del tetto delle argille rispetto alla superficie del fondale

L'analisi stratigrafica delle carote prelevate durante le attività di caratterizzazione ha permesso di individuare, nelle singole stazioni di campionamento ubicate nell'area del IV Sporgente e nell'area ad ovest di punta Rondinella, la quota del tetto delle argille azzurre pleistoceniche.

In quanto elemento di separazione tra il substrato di argille azzurre e lo strato di sedimentazione recente, eventualmente interessato da fenomeni di contaminazione, il corretto posizionamento del top dello strato di argille nello spazio si è rivelato di fondamentale importanza ai fini del calcolo dei volumi di sedimento potenzialmente contaminato.

Dall'analisi dei dati è emersa una significativa variabilità spaziale nella profondità di immersione del tetto delle argille; si è pertanto rivelato necessario valutare il grado di affidabilità delle stime prodotte.

In tal senso sono state ricavate:

- la stima della profondità media del tetto del substrato;
- la stima di una profondità più cautelativa del tetto del substrato, con probabilità inferiore al 10% di sottostimare il valore effettivo della profondità

Il metodo utilizzato per l'elaborazione delle suddette stime è quello della simulazione gaussiana sequenziale condizionale. Il primo passo consiste nella trasformazione della variabile d'indagine in una nuova variabile gaussiana tramite un anamorfosi.

Utilizzando la nuova variabile gaussiana ed il suo variogramma, ovvero il modello di variabilità spaziale, sono stati calcolati e ritrasformati nella variabile originale un migliaio di possibili campi di valori all'interno dell'area di indagine. Tali simulazioni, pur essendo calcolate con un processo casuale, rispettano ciascuna le stratigrafie nelle stazioni di campionamento, le statistiche e le leggi generali di variabilità dello spessore di sedimentazione recente. Con tale procedimento per ogni punto (cella) dell'area di indagine si ottiene una distribuzione di possibili valori. Calcolando la media dei valori in ogni punto si ottiene il valore atteso dello spessore, mentre, calcolando il quantile del 90%, si ottiene un valore che ha una probabilità maggiore o uguale al 90% di non essere inferiore allo spessore reale non noto. Le mappe così ottenute rappresentano per le due aree indagate rispettivamente il valore medio della profondità del tetto delle argille ed il valore che può cautelativamente essere assunto anche in assenza di ulteriori indagini (fig. 1).

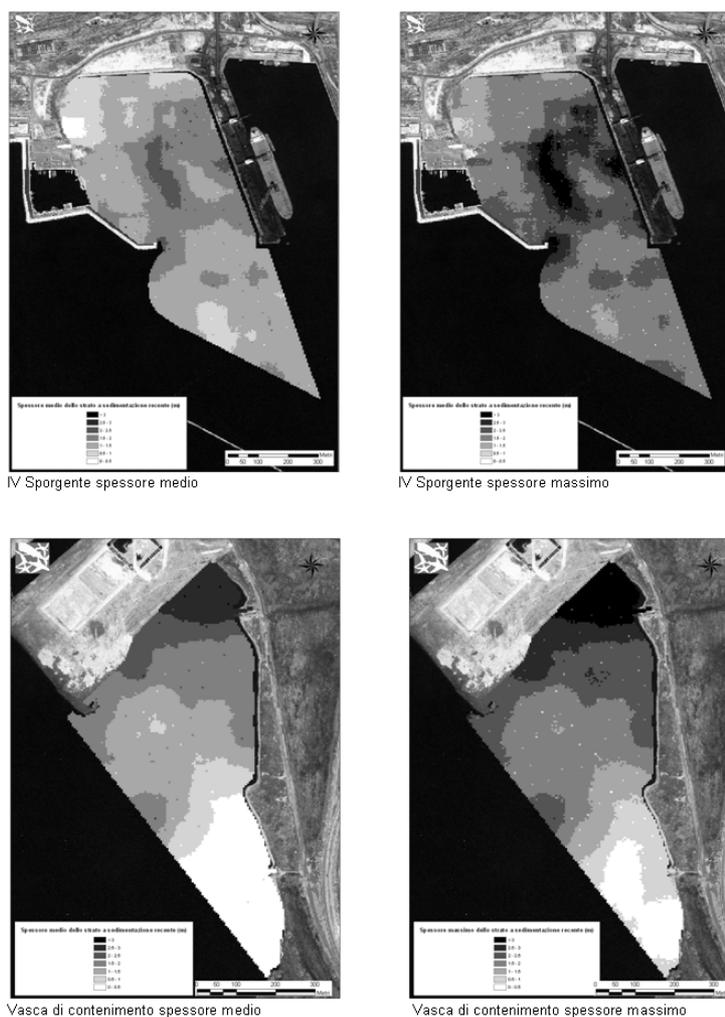


Fig. 1 – Spessore a sedimentazione recente (intervalli di 0.5m)

Stima delle concentrazioni dei contaminanti

La metodologia utilizzata per la stima delle concentrazioni dei diversi analiti all'interno del volume di indagine è quella del *block kriging*. Tale metodica si differenzia dagli altri interpolatori poiché le concentrazioni stimate all'interno di una griglia tridimensionale sono rappresentative della media di ogni singola cella (o blocco) e non solo del valore stimato nel suo baricentro.

Il *kriging ordinario*, una metodica ben nota, prevede che, partendo dai valori misurati nelle stazioni di campionamento, venga costruito il variogramma, ovvero il modello che descrive la variabilità della misura nello spazio e che successivamente tale modello venga utilizzato per la stima della concentrazione nei baricentri delle celle della griglia. La particolarità del *block kriging*, rispetto a quello ordinario, consiste nel suddividere la celle di stima in un certo numero di sottocelle (un migliaio per questo studio) e di calcolarne per ognuna la concentrazione; la media dei valori di tutte le sottocelle viene poi assegnata alla cella che le contiene.

Il vantaggio di utilizzare questo tipo di elaborazione è, in primo luogo, quello di ottenere stime con una varianza d'errore minore e quindi più affidabili rispetto a quelle conseguibili con il *kriging* puntuale e, in secondo luogo, di avere per ogni cella un valore rappresentativo di tutto il volume compreso al suo interno e non solo di quello del suo baricentro.

La scelta della dimensione della maglia utilizzata per la stima è fondamentale poiché, se da una parte al crescere della dimensione di tali maglie cresce anche l'affidabilità della stima, dall'altra è

necessario mantenere un dettaglio sufficiente al fine di evitare una diluizione della concentrazione su volumi eccessivi (Crawford, Young, 2004).

Nelle due aree indagate, a fronte di una densità di campionamento equivalente ad una maglia 50 x 50 m, per la stima della contaminazione è stata utilizzata una griglia tridimensionale con maglie di 20 x 20 m in orizzontale e di 50 cm in verticale.

Per le elaborazioni sono stati considerati gli analiti per i quali sono stati riscontrati superamenti dei valori di intervento elaborati dall'ICRAM (rif. ICRAM doc. # CII-Pr-PU-TA-valori intervento-01.04): Arsenico, Cadmio, Cromo, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco ed IPA totali. È stato inoltre preso in considerazione il Vanadio, per il quale non è stato fissato il valore di intervento, ma che è risultato essere presente in concentrazioni non giustificabili con i tenori naturali riscontrati nell'area e pertanto imputabile ad un'origine antropica.

Per ogni analita è stata studiata la variabilità spaziale ed è stato costruito il relativo variogramma. La stima delle concentrazioni nello spazio è stata quindi ricavata per Arsenico, Cromo, Nichel, Piombo, Rame, Vanadio e Zinco. Per Cadmio, Mercurio ed IPA totali, invece, i cui dati non risultano correlati nello spazio ed evidenziano una contaminazione di tipo "hot spot", si è preferito intervenire in modo ragionato, delimitando in maniera puntuale l'estensione della contaminazione nell'intorno di ciascun hot spot.

Stima delle frazioni granulometriche

La stima delle frazioni granulometriche si è resa necessaria, oltre che per la corretta gestione del sedimento, per l'applicazione dei valori di intervento per il Nichel ed il Cromo.

Per tali analiti sono infatti previste due diverse soglie di intervento, che tengono conto della

notevole variabilità della concentrazion e di tali elementi in relazione alla composizione granulometrica del sedimento: un valore più basso nel caso di campioni caratterizzati da una frazione pelitica inferiore al 20% ed un valore più elevato per i campioni che presentano

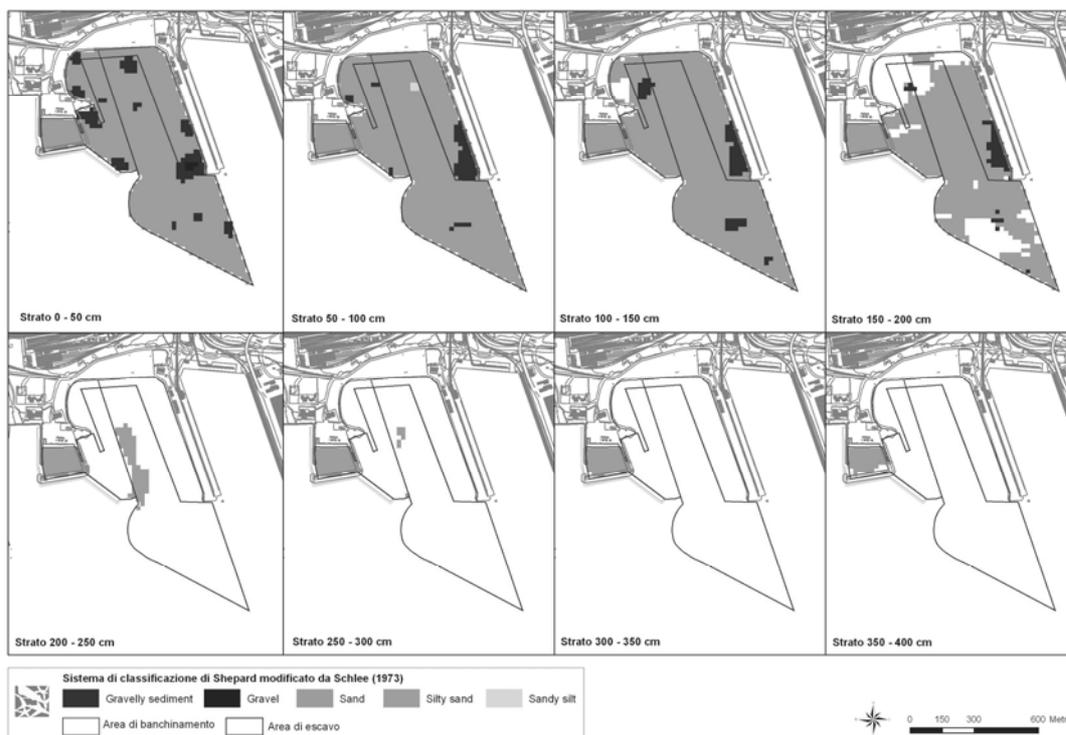


Fig. 2 – IV Sporgente
Classificazione granulometrica riferita allo spessore massimo

una frazione pelitica superiore al 20%.

Affinché le stime granulometriche siano congruenti con la realtà fisica è necessario che in ogni punto la somma di tutte le frazioni dia come risultato il 100%.

Per soddisfare questo vincolo è stato utilizzato il *block co-kriging*, una metodologia che permette di effettuare il *block kriging* su tutte le frazioni contemporaneamente, rispettando la congruenza della

stima.

Inizialmente sono stati costruiti i variogrammi diretti ed incrociati delle frazioni granulometriche prese in considerazione: sono stati ricostruiti i modelli della variabilità spaziale di tutti i passanti ai singoli vagli e delle correlazioni che legano tali

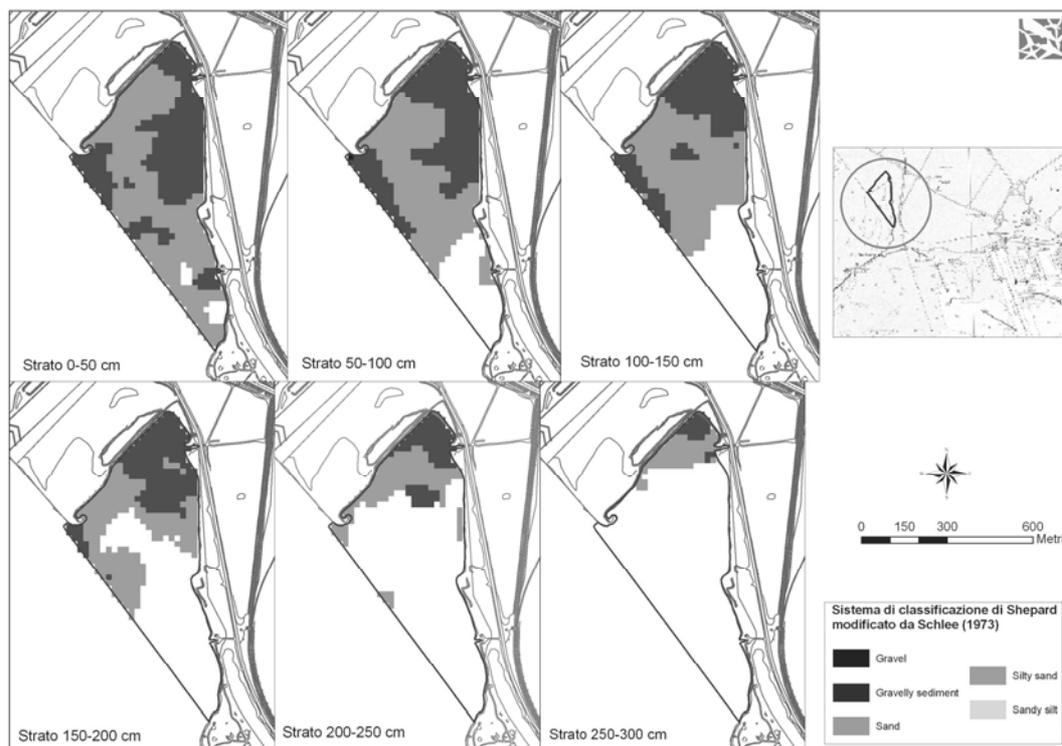


Fig. 3 – Vasca di contenimento
Classificazione granulometrica riferita allo spessore massimo

passanti fra loro.

Quindi è stato

applicato il metodo del *block co-kriging* che, tramite le informazioni contenute nei modelli precedentemente ottenuti, ha consentito di stimare contemporaneamente tutte le frazioni.

In tal modo è stato quindi possibile ottenere i valori medi delle frazioni granulometriche nel volume delle celle della griglia rispettando il vincolo imposto sulla loro somma.

Le frazioni granulometriche sono state inoltre utilizzate per identificare il sedimento secondo la classificazione di *Shepard* modificata da *Schlee* (Schlee,1973) in cui l'originale classificazione di tipo ternario che tiene conto prevalentemente delle dimensioni tessiturali medio fini del sedimento (sabbia, silt ed argilla) è stata modificata per considerare il contributo ghiaioso (fig. 2-3).

Risultati

Il livello di incertezza nella stima dello spessore dello strato a sedimentazione recente è ben rappresentato dalle differenze che si possono riscontrare tra il calcolo del volume di sedimento effettuato utilizzando il valore medio di spessore e quello ottenuto utilizzando lo spessore massimo (tab. 4).

Come si può notare l'incertezza, e quindi la variazione di volume, è molto più spiccata nel caso del IV sporgente.

Settore	Area (m ²)	Volume Medio (m ³)	Volume Massimo (m ³)	Variazione
IV Sporgente	473 450	642 670	943 576	47 %
Vasca di contenimento	282 650	360 435	489 663	36 %

Tale diverso

Tab. 4 – Volumi a sedimentazione recente

comportamento è imputabile ad una maggior eterogeneità negli spessori della seconda area, dovuta forse alle maggiori attività antropiche che hanno causato un rimaneggiamento del fondale.

Verificando i superamenti, per ogni analita analizzato, rispetto ai limiti tabellari sono state selezionate le porzioni di sedimento che necessitano di un intervento di bonifica, senza fare distinzione, in prima battuta, tra sedimento recente ed argille azzurre. Tali selezioni, in seguito,

sono state incrociate con i risultati delle stime stratigrafiche, per considerare così solo le porzioni a sedimentazione recente. In tal modo si ottengono i risultati riportati in tabella 5.

Dalla tabella si evince che mentre nella vasca di contenimento l'incertezza sulla stima dello spessore a sedimentazione recente non incide in maniera considerevole sui volumi da bonificare, la situazione è differente nel IV Sporgente dove, a secondo della stima scelta, il volume aumenta oltre il 44%. In questo contesto un approfondimento delle indagini geofisiche è probabilmente da escludere nell'area della vasca di contenimento, mentre, nell'area del IV Sporgente, conoscendo da una parte il costo di smaltimento e/o trattamento del materiale in eccesso da bonificare e dall'altra il costo della campagna di geofisica, si può valutare facilmente la convenienza di approfondire le indagini o meno.

Strato	IV Sporgente			Vasca di contenimento		
	Spessore Medio (m ³)	Spessore Massimo (m ³)	Variazione (%)	Spessore Medio (m ³)	Spessore Massimo (m ³)	Variazione (%)
0-50 cm	27 425	27 550	0.46	32 262	33 206	2.93
50-100 cm	28 487	33 650	18.12	13 656	14 162	3.71
100-150 cm	22 200	38 269	72.38	4 331	4 637	7.07
150-200 cm	11 131	29 019	160.70	2 356	3 175	34.76
200-250 cm	0	31	-	0	912	-
250-300 cm	0	0	0.00	0	0	0.00
0-3 m	89 244	128 519	44.01	52 606	56 093	6.63

Tab. 5 – Volume di sedimento da bonificare in funzione dello spessore a sedimentazione recente

Conclusioni

L'applicazione delle diverse metodologie geostatistiche ha permesso di offrire una risposta a problemi di difficile risoluzione con i metodi di interpolazione classici. In particolare tali metodiche sono state in grado di tradurre problemi di difficile comprensione ai non addetti ai lavori, quali la variabilità spaziale e la varianza di stima, in termini di economia di progetto favorendo così il processo decisionale. Di contro per il corretto utilizzo di tale metodologie è necessaria una conoscenza approfondita della teoria che ne è alla base per evitare il rischio di ottenere dei risultati totalmente irreali.

Bibliografia

Chilès J.P, Delfiner P, (1999), "Geostatistics Modeling Spatial Uncertain", Wiley & Son, New York

Da Silva Alice Ceita E. M, Raspa G, Simones J, Bruno R. (2000), "Estimation of the in situ grain-size distribution curve of Quihita kaolin deposit(south of Angola)", Geostat 2000, 2: 847-854

De Souza L. E, Costa J. F. C. L, Koppe J. C. (2004), "Uncertainty Estimate in Resources Assessment: A Geostatistical Contribution", Natural Resources Research, 13, 1:1-15

Gotway Crawford C. A, Young L. J (2004), "Change of support: an inter-disciplinary Challenge", Geoenvironment 2004 proceedings: 1-14

Schlee, John, (1973), Atlantic Continental Shelf and Slope of the United States sediment texture of the northeastern part: U.S. Geological Survey Professional Paper 529-L, 64 p.