

ANALISI GEOSTATISTICA DELLA DISPERSIONE DI INQUINANTI IN FALDA

Rose-Line Spacagna

DICeM, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
rlspacagna@unicas.it

Massimo Ramondini

DIGA, Università di Napoli Federico II
ramondin@unina.it

Giacomo Russo

DICeM, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
gjarusso@unicas.it

Chantal de Fouquet

Géosciences - Ecole des Mines de Paris -Mines ParisTech
chantal.de_fouquet@mines-paristech.fr

Sommario

Nella nota si illustrano alcuni risultati di un'indagine mirata allo studio di un caso di dispersione di inquinanti nella falda idrica sotterranea, legata alle attività di coltivazione di alcune discariche per rifiuti solidi non pericolosi e pericolosi. L'area oggetto di studio è una tipica piana di natura alluvionale a destinazione prevalentemente agricola, caratterizzata dalla presenza di terreni stratificati di granulometria variabile (da sabbie limose ghiaiose a sabbie argillose) e di permeabilità relativamente elevata, al tetto di una formazione argillosa impermeabile di base. La falda freatica è presente a circa 20 m dal piano campagna. Dal risultato delle analisi chimiche effettuate sulle acque prelevate ai pozzi di controllo e in pozzi circostanti il sito di discarica è stata accertata l'entità e la natura degli inquinanti. Un'analisi di tipo geostatistico ha consentito di caratterizzare la provenienza degli inquinanti entro l'area di indagine.

Introduzione

Nei problemi legati alla difesa ed alla salvaguardia delle grandi aree, è centrale la necessità di poter rappresentare l'evoluzione e l'estensione di un fenomeno naturale oggetto di studio. A partire dai dati di campionamento, e considerando i valori come una realizzazione della variabile aleatoria che descrive il fenomeno, è possibile rappresentare quest'ultimo tenuto conto che le variabili rilevanti sono variabili regionalizzate (Matheron, 1972). La variabilità della grandezza che caratterizza il fenomeno in esame è influenzata dai caratteri strutturali del dominio, e la struttura di tale variabilità (detta anche variabilità spaziale) può essere studiata mediante un approccio geostatistico (de Fouquet, 2006).

Nella nota sono presentati alcuni risultati di uno studio della dispersione di inquinanti nella falda idrica sotterranea indotti dall'attività di coltivazione di alcune discariche di rifiuti pericolosi e non pericolosi. Sulla base delle indagini effettuate, è stato possibile rappresentare il livello di inquinamento mediante l'elaborazione di carte della concentrazione degli inquinanti rinvenuti, unitamente alla precisione della stima effettuata.

Metodologia d'indagine e risultati

L'area d'indagine è una zona agricola dalla morfologia prevalentemente pianeggiante. La stratigrafia del sottosuolo è costituita per i primi 25 m dal piano campagna da terreni con granulometria grossolana (da sabbia leggermente argillosa a sabbia limosa ghiaiosa), al di sotto dei quali è presente una formazione argillosa di spessore pari a circa 75 m. La falda freatica ha superficie libera a circa 21 m dal piano campagna.

Il sito per l'impianto di smaltimento ha una superficie di circa 25.000 m², e al suo interno sono ubicate n.5 discariche, di tipologia a vasca, di cui tre per rifiuti solidi urbani e due per rifiuti speciali e tossici. Delle cinque vasche presenti nell'impianto di smaltimento solo due sono attualmente in servizio (Figura 1).

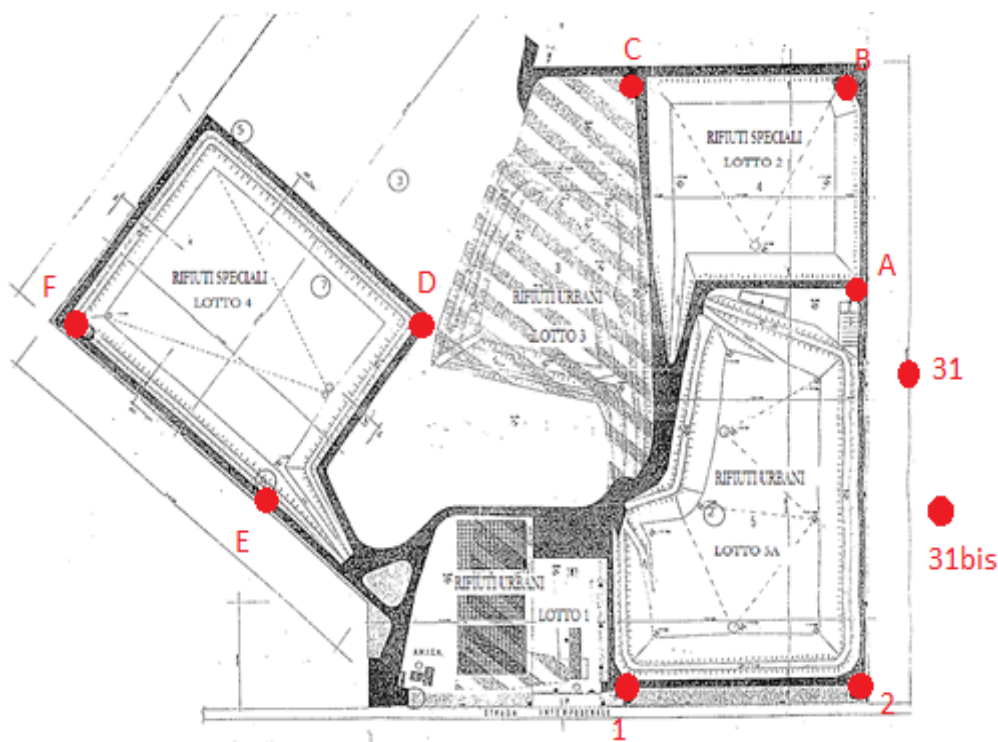


Figura 1: Ubicazione delle discariche e dei pozzi di controllo entro il sito dell'impianto.

Per definire la concentrazione degli inquinanti in falda e di poterne stabilire la provenienza, l'area d'indagine comprendente il sito delle discariche è stata estesa ad un'area di circa 16 km², come rappresentato in Figura 2. Nell'area di indagine sono stati localizzati tutti i pozzi in esercizio a servizio delle attività agricole che si svolgono sul territorio, al fine di procedere al campionamento delle acque di falda. Unitamente ai pozzi di controllo entro i perimetri delle discariche, entro l'area di indagine sono stati ritenuti significativi ai fini del campionamento delle acque di falda ancora 15 pozzi (Figure 1 e 2), e fra questi 7 sono stati utilizzati per il campionamento delle acque di falda per lo svolgimento della analisi chimiche.

I risultati delle analisi sono riportati nella Tabella 1, ove le concentrazioni di inquinanti sono riferite ai sette pozzi ubicati entro l'area di indagine ma al di fuori del perimetro del sito di smaltimento, e nella Tabella 2, ove le misure sono riferite alle concentrazioni di sostanze nelle acque prelevate entro il perimetro del sito di smaltimento.

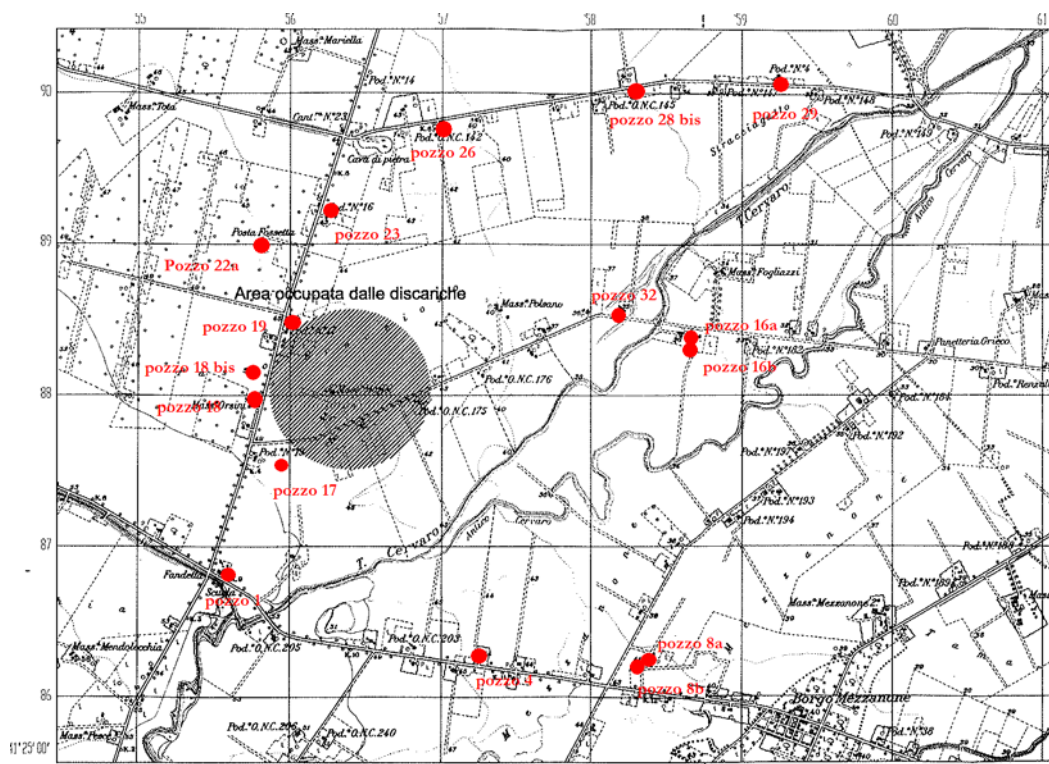


Figura 2: Estensione dell'area di indagine.

Tabella 1: Analisi chimiche su campioni di acqua prelevati all'esterno del sito di smaltimento

Pozzo n°	8	17	18	28 bis	29	31 bis	32
PH	7,4	7,5	7,3	7,3	7,1	6,7	7,3
NH3 (mg/l)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	99	N.D.
NO3 (mg/l)	2,2	12	130	43	98	<1	19
NO2 (mg/l)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
SO4 (mg/l)	73	71	122	111	287	58	138
PO4 (mg/l)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
MBAS (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,95	<0,05
Cl (mg/l)	82	92	152	213	364	1 050	150
COD (mg/l O2)	-	-	-	-	-	614	-
Coliformi totali (%ml)	<10	350	240	>105	10	1 200	820
Conformi fecali (%ml)	<10	60	<10	3 300	<10	<10	<10
Streptoc. Fecali (%ml)	<10	40	<10	17 400	<10	10	<10
Fe (ppb)	740	450	<40	9 200	150	20 000	940
Fe in soluzione (ppb)	16	14	10	35	28	8 700	26
Cu (ppb)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
Mo (ppb)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
Mn (ppb)	<40	50	<40	450	<40	5 600	<40
Cr (ppb)	<20	<20	<20	<20	<20	24	<20
Pb (ppb)	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Cd (ppb)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zn (ppb)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
As (ppb)	<10	<10	-	-	-	100	10

I risultati delle analisi chimiche hanno evidenziato nei pozzi 1, A, e D, tutti interni al perimetro delle discariche, e nel pozzo 31bis, situato immediatamente all'esterno del sito di smaltimento un inquinamento molto elevato (sostanza organica, ammoniacca, cloruri, ferro, manganese, arsenico e nel pozzo A anche rame, piombo e zinco). I pozzi B, C ed F, ancora interni all'impianto di smaltimento non presentano tuttavia concentrazioni di inquinanti rilevanti. I pozzi al perimetro del sito di smaltimento non hanno messo in evidenza concentrazioni significative dei valori degli inquinanti ricercati con le analisi.

Tabella 2: Analisi chimiche su campioni di acqua prelevati entro il perimetro del sito di smaltimento

Pozzo n°	1	2	A	B	C	D	E	F
PH	6,6	7,5	6,7	6,8	7,5	6,5	7,1	6,9
NH3 (mg/l)	77	Tracce	355	Tracce	0,4	44	N.D.	N.D.
NO3 (mg/l)	<1	5,8	<1	2,6	<1	<1	62	57
NO2 (mg/l)	N.D.	N.D.	N.D.	Tracce	N.D.	N.D.	N.D.	2,2
SO4 (mg/l)	47	107	11	94	2	76	141	134
PO4 (mg/l)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
MBAS (mg/l)	0,87	<0,05	2,54	0,06	<0,05	0,34	<0,05	<0,05
Cl (mg/l)	1 040	117	1 560	357	301	739	156	326
COD (mg/l O2)	576	-	1 480	<20	<20	178	-	<20
Coliformi totali (%ml)	2 000	46 000	190	700	90	20	580	980
Conformi fecali (%ml)	<10	<10	<10	50	<10	<10	10	10
Streptoc. Fecali (%ml)	1 230	<10	1 200	<10	<10	<10	<10	<10
Fe (ppb)	28 000	1 540	48 000	8 700	21 000	33 000	420	6 800
Fe in soluzione (ppb)	30 000	99	11 000	25	110	180	20	14
Cu (ppb)	<40	<40	48	<40	<40	<40	<40	<40
Mo (ppb)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
Mn (ppb)	9 400	200	6 000	125	56	7 200	<40	130
Cr (ppb)	32	<20	94	<20	<20	<20	<20	<20
Pb (ppb)	<50	<50	53	<50	<50	<50	<50	<50
Cd (ppb)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zn (ppb)	<40	<40	85	<40	<40	<40	<40	<40
As (ppb)	220	22	200	<10	20	124	15	<10

Analisi geostatistica

La rappresentazione cartografica della dispersione degli inquinanti è stata perseguita attraverso alcune fasi di analisi statistica dei dati. La fase di analisi esplorativa ha come obiettivo principale di riconoscere sia la natura fisica del fenomeno sia la configurazione dei dati disponibili. Il fenomeno naturale è indagato non solo in base alla distribuzione statistica (ricerca degli outliers) ma anche sulla distribuzione spaziale dei dati (ricerca di un trend, delle autocorrelazioni, ecc.). Una seconda fase di analisi variografica ha avuto lo scopo di elaborare un modello di variabilità spaziale dei dati sulla base dei variogrammi sperimentali. Il modello ha costituito poi la base per la stima dei valori delle variabili rilevanti nelle aree oggetto di indagine. Lo studio è stato condotto tramite il programma di calcolo numerico statistico e geostatistico di ISATIS. ® della Geovariances, per le analisi delle concentrazioni di Solfati, Nitrati e Ferro.

Nella Figura 3 sono rappresentate le mappe di localizzazione dei punti di misura (a) e i diagrammi di distribuzione di frequenza (b) delle concentrazioni degli inquinanti considerati nell'analisi. I colori permettono di visualizzare le soglie imposte dalla normativa. La distribuzione di frequenze delle variabili è asimmetrica, a causa della presenza di elevate differenze fra valori. Per le concentrazioni di Ferro, i valori elevati sono riconducibili all'attività di smaltimento dei rifiuti. Al contrario, nel caso di nitrati (NO₃) e solfati (SO₄) ciò non è verificato.

In Figura 4 i punti in blu del grafico, corrispondenti a coppie di punti di misura, costituiscono la *nuvola variografica*. In verde è invece rappresentato il punto media dei punti appartenenti al corrispondente intervallo di distanza. Il variogramma sperimentale del Ferro presenta un andamento crescente (Figura 4), ad indicare una correlazione fra valori misurati che decresce con la distanza, e ciò a partire da distanze comprese fra 500 m e 600 m. Per la concentrazione di nitrati (Figura 4), si nota che punti di misura a distanza di circa 200 m e 500 m sono caratterizzati da valori molto diversi, registrando un'elevata variabilità (modesta correlazione). Per quanto riguarda infine il variogramma sperimentale dei Solfati (Figura 4),

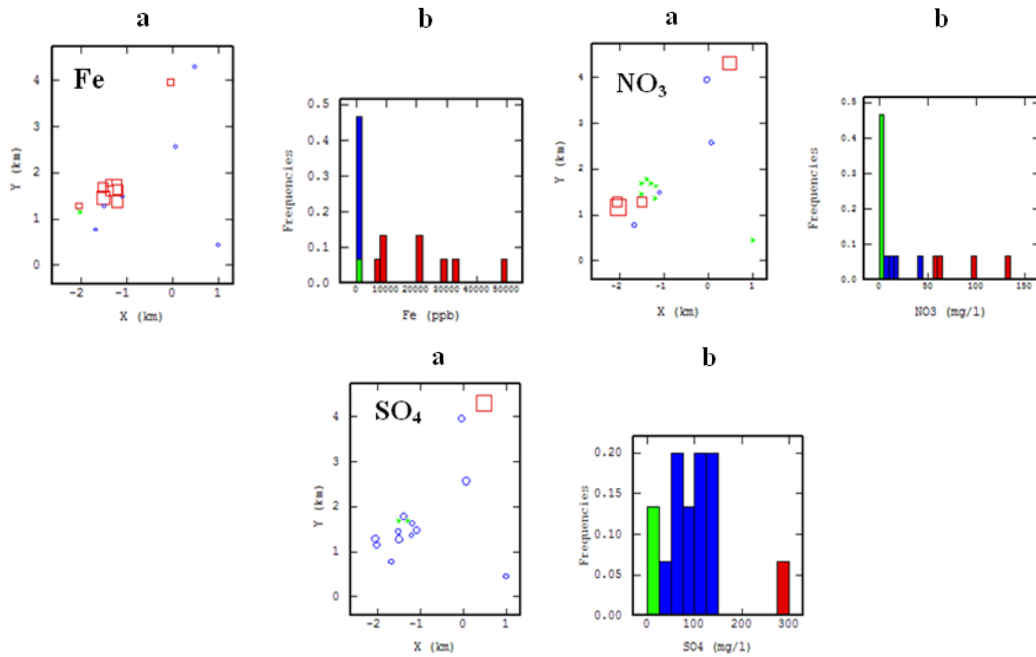


Figura 3: Mappe di localizzazione dei pozzi e istogrammi delle variabili

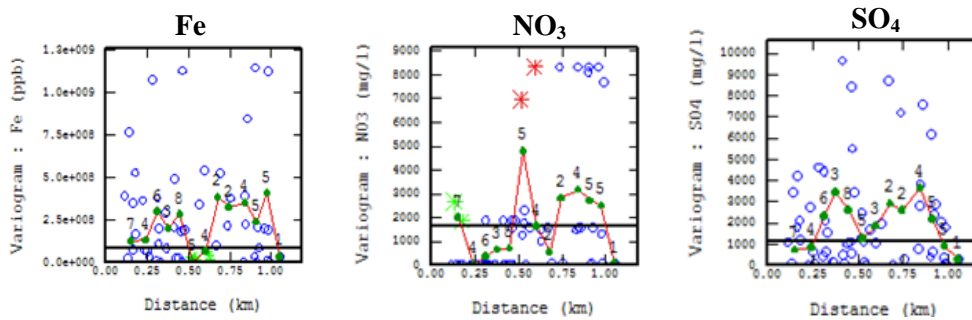


Figura 4: Variogrammi sperimentali omnidirezionali del Ferro, dei Nitrati, e dei Solfati.

Tabella 3: Cross-validation delle concentrazioni di Ferro, Nitrati e Solfati

Modello di Variogramma	Ferro			
	Lineare	Sferico ⁽¹⁾	Esponenziale ⁽¹⁾	Cubico ⁽¹⁾
Media E	0,06	0,05	0,03	0,08
Deviazione standard E	1,85	1,46	1	1,5
Coefficiente di correlazione Z*/Z	0,3	0,31	0,25	0,49
Coef. di correlazione E/Z*	0,42	0,41	0,24	0,33
Modello di Variogramma	Nitrati			
	Lineare	Sferico ⁽²⁾	Esponenziale ⁽²⁾	Cubico ⁽²⁾
Media E	0,05	0,004	-0,001	-0,002
Deviazione standard E	1,3	1,02	0,87	1,21
Coefficiente di correlazione Z*/Z	0,4	0,41	0,42	0,43
Coef. di correlazione E/Z*	0,44	0,28	0,12	0,34
Modello di Variogramma	Solfati			
	Lineare	Sferico ⁽³⁾	Esponenziale ⁽³⁾	Cubico ⁽³⁾
Media E	-0,01	-0,05	-0,03	-0,07
Deviazione standard E	1,8	1,37	1,31	1,49
coefficiente di correlazione Z*/Z	0,21	0,23	0,17	0,27
Coef. di correlazione E/Z*	0,46	0,18	0,14	0,25

E= Errore di stima; Z=Variabile misurata; Z*=Variabile stimata
 (1) range: 500 m ; (2) range: 600 m; (3) range: 400 m

l'andamento si rivela simile a quanto osservato per il Ferro.

La determinazione del modello teorico di variogramma, che è la base per la stima delle variabili oggetto di studio, consiste nella selezione del modello che meglio si adatta al

variogramma sperimentale. In particolare, è rilevante il comportamento all'origine, che informa circa il grado di regolarità della variabile, e l'andamento a grandi distanze, con il raggiungimento della soglia (*sill*) entro una certa distanza (*range*) oltre la quale non esiste più correlazione spaziale. Per quanto riguarda il Ferro, i Nitrati e i Solfati sono stati selezionati 4 modelli di variogrammi differenti (lineare, sferico, esponenziale e cubico). La *cross validation* ha consentito di operare una calibrazione delle proprietà dei variogrammi e di giungere ad una scelta fra modelli di correlazione spaziale selezionati, tramite alcuni parametri di qualità, riportati in dettaglio nella Tabella 3. In rosso, per ogni concentrazione di inquinante studiata, è riportato il modello di variogramma utilizzato per la stima.

Distribuzione delle concentrazioni degli inquinanti

La stima delle concentrazioni di inquinanti nell'area di indagine è stata effettuata attraverso l'interpolazione dei dati mediante *kriging*. L'efficacia di tale metodo risiede nella possibilità di valutare il valore della concentrazione di inquinanti in punti diversi da quelli in cui è stata effettuata la misura (Chilès e Delfiner, 1999). Il metodo fornisce una stima precisa prendendo in considerazione sia le informazioni di natura geometrica (numero e disposizione nello spazio dei punti di misura), sia le informazioni di natura strutturale descritte dal variogramma, e consente di quantificare la precisione della stima tramite la varianza dell'errore di stima associata.

Le variabili Ferro, Nitrati e Solfati sono state stimate utilizzando il *kriging puntuale ordinario*. In base alla varianza dell'errore di stima, si evidenzia che all'aumentare della distanza dal punto di misura la varianza aumenta, con la conseguente riduzione di precisione del valore stimato. Impostando un valore di soglia oltre il quale si considera il risultato della stima poco attendibile, si procede a rappresentare la distribuzione degli inquinanti solo le aree per le quali la stima risulta significativa. I risultati di tale procedimento sono rappresentati nelle Figure 4 e 5, nelle quali alle carte riportanti la varianza della stima sono associate le carte di distribuzione degli inquinanti oggetto di studio. Nel caso del Ferro l'inquinamento delle acque di falda sembra strettamente connesso alle attività svolte presso il sito di smaltimento dei rifiuti, e tale fenomeno sembra essersi diffuso anche al di fuori del perimetro delle discariche.

Per i nitrati ed i solfati il fenomeno di inquinamento non sembra riconducibile al sito di smaltimento, ma sembra principalmente legato alle attività agricole che caratterizzano l'uso del suolo in tale area.

Conclusioni

Nella nota sono riportati i risultati dell'analisi geostatistica della dispersione di inquinanti in falda entro un'area in cui sono ubicate alcune discariche. Lo studio condotto ha consentito di pervenire alla stima dei valori di concentrazione di inquinanti nell'area in esame a partire dalle misure puntuali disponibili, prendendo in considerazione sia le informazioni di natura geometrica (numero e disposizione nello spazio dei punti di misura), sia le informazioni di natura strutturale che ne caratterizzano la variabilità spaziale. La stima dei valori di concentrazione ha permesso di rappresentare il fenomeno mediante l'elaborazione di carte tematiche, riferite alle zone per le quali la precisione della stima risultasse al di sotto di una soglia stabilita.

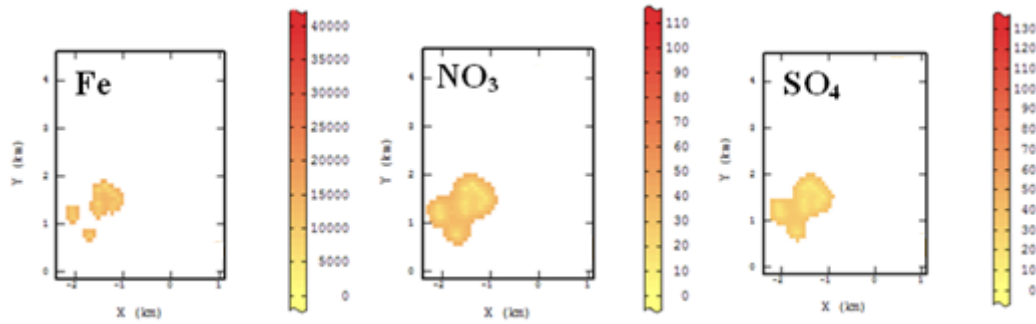


Figura 4: Mappa della varianza dell'errore di stima per le variabili Ferro, Nitrati e Solfati.

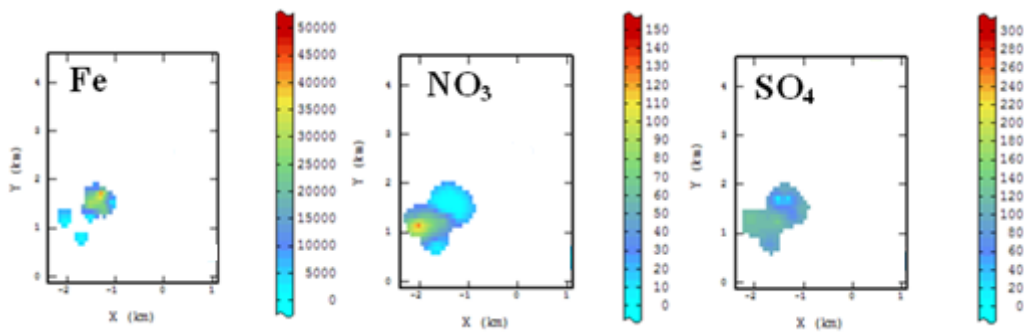


Figura 5: Mappe delle variabili stimate per le variabili Ferro, Nitrati e Solfati.

Bibliografia

- Chilès J.-P., Delfiner P., 1999. "Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty" – Wiley-Interscience Publication
- de Fouquet C., 2006. "La modélisation géostatistique des milieux anthropisés". Mémoire des Sciences de la Terre N°2006-13. Académie de Paris, Université Pierre et Marie Curie.
- Matheron G., 1972. "The theory of regionalized variable and its applications". Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique. Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.