



A.D. MDLXII

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI

FACOLTÀ DI AGRARIA

DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E SISTEMI ARBOREI

Corso di dottorato di ricerca in:

Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali

XXI CICLO

**MUTAMENTI CLIMATICI E CARBON SINK:
VALUTAZIONE DELLA VARIAZIONE SPAZIALE DELLE
RISERVE DI CARBONIO NEL SUOLO IN SISTEMI
COLTURALI ESTENSIVI TIPICI DELLA GALLURA
(SARDEGNA NORD – ORIENTALE)**

Coordinatore: Chiar.mo Prof. PIETRO DEIDDA

Docente guida: Dott. LUIGI LEDDA

Dottorando:

Dott.ssa Giulia R. Urracchi

ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

Indice

1. I cambiamenti climatici	3
1.1. Cause delle variazioni climatiche	6
1.2. Ruolo dell'agricoltura nell'emissione di gas ad effetto serra e possibili strategie di mitigazione	9
1.3. Impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi naturali	11
1.3.1. Ecosistemi	11
1.3.2. Risorse idriche	12
1.4. Effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura	12
1.5. Strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici	14
1.5.1. Strategie per la mitigazione dei cambiamenti climatici: ruolo del settore agricolo	15
1.5.2. Strategie di gestione sostenibili	18
2. La sostanza organica nel terreno	20
2.1. Il suolo come sink di carbonio	20
2.2. Gli apporti organici	23
2.3. Degradazione, resintesi e polimerizzazioni	24
2.4. Il turnover della sostanza organica	24
3. Approcci metodologici per l'analisi dei dati ambientali	26
3.1. La variabilità spaziale dei dati ambientali	26
3.2. Approcci geostatistici	28
3.3. Studio della correlazione spaziale	29
3.4. Le variabili regionalizzate	35
3.5. Il variogramma	40
3.6. Il kriging	41
4. I sistemi informativi geografici	43
4.1. La struttura dei dati geografici	44
4.2. Funzionalità di un GIS	45
4.3. Progettazione di un GIS	48
4.3.1. La definizione degli obiettivi	48
4.3.2. La creazione del database	48
4.3.3. L'analisi dei dati	49

4.3.4. La presentazione dei risultati	49
5. Obiettivi della ricerca	50
6. Il caso di studio: area “Berchidda-Monti”	53
6.1. Inquadramento climatico	54
6.2. Uso del suolo	56
7. Materiali e metodi	57
7.1. La creazione del Sistema Informativo Territoriale	57
7.2. Caratterizzazione pedologica dell’area di studio	61
7.2.1. Tassonomia dei suoli	62
7.3. Caratterizzazione floristica e vegetazionale dell’area di studio	64
7.4. Caratterizzazione agronomica	70
7.5. Campionamento ed analisi	75
7.5.1. Schema di campionamento	75
7.5.2. Analisi di laboratorio	77
7.5.3. Analisi statistica e geostatistica dei dati	78
8. Risultati e discussione	80
8.1. Caratterizzazione pedologica dell’area “Berchidda-Monti”	80
8.1.1. Caratterizzazione pedologica dei sistemi colturali “pascolo” ed “erbaio”	91
8.2. Analisi statistica	97
8.2.1. Pascolo	97
8.2.2. Erbaio autunno-vernino	99
8.3. Confronto tra pascolo ed erbaio	101
8.3.1. Correlazione tra variabili	104
8.4. Risultati dell’analisi geostatistica	106
8.4.1. Stima dello stock di carbonio organico nel pascolo	106
8.4.2. Stima dello stok di carbonio organico nell’erbaio	114
9. Conclusioni	119
Bibliografia	124

1. I CAMBIAMENTI CLIMATICI

Nella prima conferenza mondiale sui cambiamenti climatici, nel 1979, si avvia la discussione su eventuali metodi per prevedere e prevenire potenziali cambiamenti climatici causati da attività umane, che potrebbero avere un effetto negativo sul benessere dell'umanità.

Argomento chiave della conferenza è la tendenza all'aumento della temperatura media globale, di gran lunga superiore al passato e il sospetto che tale riscaldamento non sia del tutto imputabile a cause naturali (come la variabilità dell'attività solare e le eruzioni vulcaniche).

La crescente attenzione internazionale sul tema ha portato il WMO (World Meteorological Organization, Organizzazione meteorologica mondiale) e l'UNEP (United Nations Environment Program, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente) a creare, nel 1988 l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Gruppo intergovernativo sul cambiamento del clima).

L'IPCC, il massimo consesso mondiale di esperti sul clima, è formato da 3.000 scienziati chiamati a valutare l'informazione disponibile nei campi scientifico, tecnico e socio-economico legati ai cambiamenti climatici, ai possibili impatti e alle strategie di adattamento e di mitigazione. L'IPCC ha redatto finora quattro rapporti (1990, 1995, 2001 e 2007).

La definizione di cambiamento climatico è per l'IPCC un cambio nello stato del clima, identificabile a seguito di variazione nei valori medi e/o di variabilità dei fattori climatici, rilevabile nel tempo, almeno per alcuni decenni, mediante l'utilizzo di test statistici.

Il primo rapporto dell'IPCC (1990), ha evidenziato la correlazione tra le emissioni dei gas-serra antropici e un probabile cambiamento climatico. Ciò ha costituito la base scientifica per i negoziati della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Nel 1992, i delegati di 150 paesi hanno infatti approvato la Convenzione, adottata a New York il 9 maggio e presentata ai governi per la firma nel corso del Vertice della Terra svoltosi a Rio de Janeiro nel mese di giugno 1992. La Convenzione, sottoscritta a Rio da 155 Paesi, è entrata in vigore il 21 marzo 1994.

Nella Convenzione si definisce un obiettivo comune di stabilizzazione delle concentrazioni di gas-serra per la protezione del sistema climatico e si promuovono interventi a livello nazionale e internazionale per il raggiungimento di tale obiettivo; seppure non vincolati, i Paesi industrializzati si impegnano a riportare entro il 2000 le proprie emissioni di gas-serra ai livelli del 1990.

Il progredire dell'UNFCCC è garantito dalla Conferenza delle Parti (COP - *Conference of Parties*), organo formato da rappresentanti di tutti i Paesi firmatari dell'UNFCCC il quale si riunisce, solitamente con cadenza annuale, per promuovere e controllare l'applicazione della Convenzione e per adottare nuovi impegni.

Le riunioni della Conferenza delle Parti valutano annualmente le azioni intraprese e gli impegni da assumere, alla luce delle conclusioni dei rapporti dell'IPCC. Tutte le decisioni che ne conseguono, secondo la prassi delle Nazioni Unite, per essere adottate devono ottenere il consenso di tutti i Paesi firmatari.

Nel 1995 si tenne a Berlino la prima Conferenza delle Parti (COP 1), alla quale parteciparono delegati di 117 paesi e osservatori di altri 53 paesi. In tale sede i negoziatori conclusero che gli impegni assunti nella Convenzione UNFCCC non erano sufficienti e lanciarono il "mandato di Berlino", che aprì un nuovo ciclo di negoziati.

L'adozione del Protocollo di Kyoto nel 1997, in occasione della COP 3 a Kyoto, costituì una svolta nella politica dei cambiamenti climatici. Il Protocollo prevede infatti che i Paesi industrializzati, nel periodo 2008-2012, riducano del 5% le emissioni dei gas-serra a livello mondiale rispetto all'anno base 1990.

Per conseguire i propri specifici obiettivi di riduzione, i Paesi industrializzati possono fare uso degli assorbimenti di CO₂ (anidride carbonica) da foreste e terreni agricoli (i cosiddetti carbon sink) e dei meccanismi di cooperazione internazionale per ridurre le emissioni. I dettagli operativi relativi all'uso di questi strumenti sono stati però definiti solo dalla COP 7, svoltasi a Marrakech nel novembre 2001. La COP 9, che si è riunita a Milano nel dicembre 2003, ha ultimato le attività preparatorie all'attuazione del Protocollo, approvando le modalità di realizzazione degli interventi di cooperazione internazionale nel settore agricolo e forestale. In particolare:

- Clean Development Mechanism (CDM), consente ai Paesi industrializzati e ad economia in transizione la realizzazione di progetti destinati a produrre benefici ambientali nei Paesi in via di sviluppo, in termini di riduzione delle emissioni di gas-serra e di sviluppo economico e sociale degli stessi e, allo stesso tempo, di generare crediti di emissione per i Paesi che promuovono gli interventi;
- Joint Implementation (JI), consente ai Paesi industrializzati e ad economia in transizione la realizzazione di progetti volti a ridurre le emissioni di gas-serra in un altro Paese dello stesso gruppo e utilizzare i crediti derivanti congiuntamente al Paese ospite;
- Emissions Trading (ET), consente lo scambio di crediti di emissione tra Paesi industrializzati e ad economia in transizione: un Paese che consegue una diminuzione delle proprie emissioni di gas serra superiore al proprio obiettivo può cedere (ricorrendo all'ET) tale "credito" ad altro Paese che, al contrario, non ha rispettato i propri impegni.

Il Protocollo entra in vigore il 16 febbraio 2005 dopo la ratifica da parte di 55 Paesi firmatari della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici, responsabili per almeno il 55% delle emissioni di CO₂ del 1990.

Nel 2001 gli scienziati dell'IPCC, con il terzo rapporto di valutazione, concordano nel ribadire che il clima terrestre si sta riscaldando (identificando un innalzamento medio della temperatura sulla superficie terrestre di circa 0,6°C nell'ultimo secolo) e che la maggior parte del riscaldamento osservato è attribuibile alle attività umane, in particolare alla crescita delle emissioni di gas-serra. Questi dati trovano conferma anche nel quarto rapporto dell'IPCC; dall'analisi dei dati meteorologici in un arco di 12 anni, compresi tra il 1995 ed il 2006, undici figurano tra i 12 più caldi mai registrati a partire dal 1850.

La tendenza lineare di aumento delle temperature, considerando un periodo di riferimento di cento anni (1906-2005), è di 0.74 °C (± 0.18); tale aumento è distribuito su tutto il pianeta ma in misura maggiore alle alte latitudini settentrionali.

Nella regione artica infatti, la media delle temperature è aumentata ad un ritmo quasi doppio rispetto alla media mondiale degli ultimi cento anni.

Per quanto riguarda gli oceani, le osservazioni effettuate a partire dal 1961 fanno registrare un incremento nella temperatura media fino alla profondità di 3000 metri dovuto all'assorbimento di oltre l'80% del calore incorporato dal sistema climatico. A partire dal 1983, la dilatazione termica degli oceani ha contribuito per circa il 57% all'aumento del livello medio dei mari, il 28% di tale aumento è dovuto allo scioglimento dei ghiacciai ed il restante 33% alla diminuzione delle calotte polari.

I dati registrati da satellite a partire dal 1978 mostrano che l'estensione dei ghiacci artici è diminuita in media del 2.7% (± 0.6) per decennio. (fonte IPCC, Synthesis Report Climate Change 2007).

1.1 CAUSE DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE

Fino a tempi recenti, le variazioni climatiche erano dovute a fenomeni naturali, quali ad esempio le variazioni dell'attività solare o della circolazione oceanica. Oggi risulta invece chiaro che anche le attività antropiche, come ad esempio l'uso dei combustibili fossili e il cambio dell'uso del suolo (in particolare la deforestazione) generano i mutamenti climatici (IPCC, 2001).

L'effetto serra è un processo naturale che ha reso la Terra un pianeta abitabile. La concentrazione naturale dei gas serra ha reso la temperatura terrestre tollerabile (Schlesinger, 1995).

Le attività antropiche provocano un aumento delle emissioni dei gas ad effetto serra, in particolare anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e ossido di azoto (N₂O). Tale incremento determina un riscaldamento della temperatura terrestre in quanto i gas serra sono in grado di trattenere la radiazione ad onda lunga all'interno dell'atmosfera e una maggiore formazione di vapore acqueo che si traduce, a sua volta, in un ulteriore incremento delle temperature.

Il potenziale di riscaldamento globale dei diversi gas serra è molto variabile; alcuni sono molto efficaci e hanno lunga permanenza in atmosfera (es. CO₂, CH₄, NO₂). L'IPCC definisce come "potenziale di riscaldamento globale" o "radiative forcing" l'influenza che un determinato fattore esercita sul bilancio di energia in

entrata ed in uscita dal sistema terra-atmosfera, e costituisce un indice dell'importanza di quel determinato fattore (in questo caso i gas serra) come possibile meccanismo di cambio climatico.

I gas ad effetto serra assorbono calore e non permettono alle radiazioni ad onda lunga di essere riflesse nello spazio. Tali gas hanno origine sia naturale che sintetica. I gas naturali includono il vapore acqueo, l'anidride carbonica (CO₂), il monossido di carbonio (CO), il metano (CH₄), il protossido di azoto (N₂O), l'ossido di azoto (NO), ed il biossido di azoto (NO₂), questi ultimi due chiamati genericamente NO_x e l'ozono (O₃).

Nel periodo compreso tra il 1970 ed il 2004, le emissioni mondiali di gas serra derivanti dall'attività antropica sono aumentate di circa il 70%. Il settore energetico, con la combustione dei combustibili fossili, e quello dei trasporti rappresentano le maggiori fonti di emissione di gas ad effetto serra; essi rappresentano circa il 50% del potere di riscaldamento globale totale, del quale il 40% è causato dalla CO₂ ed il 10% dal CH₄ e dall'O₃.

Il settore agricolo, a livello mondiale, contribuisce approssimativamente per il 50% dell'incremento annuale di gas serra prodotti dall'uomo, con una produzione di circa il 50% delle emissioni di metano, il 75% delle emissioni di ossido nitroso e il 5% delle emissioni antropiche di CO₂ (Cole et al., 1996).

La deforestazione e il conseguente incendio delle biomasse, assieme agli altri cambiamenti nell'uso del suolo contribuiscono per un ulteriore 14%.

Alcuni climatologi sostengono che le emissioni di gas serra derivanti dalle attività antropiche abbiano già provocato un aumento delle temperature di 0.5 °C (± 0.2 °C) negli ultimi 100 anni (Mahlman, 1997) e prevedono che nei prossimi 100 anni l'arricchimento atmosferico di gas serra prodotti dalle attività umane porterà ad un riscaldamento globale di 1-5 °C (OSTP,1997). Se tale previsione si realizzasse la conseguenza porterebbero ad un cambiamento globale della vegetazione e delle zone ecologiche.

L'anidride carbonica è il gas serra maggiormente coinvolto nell'incremento dell'effetto serra; alcuni autori sostengono che l'aumento della sua concentrazione causi circa il 50% del "radiative forcing" (Rodhe, 1990). La concentrazione della CO₂ nell'atmosfera è passata da circa 280 ppm nel 1850 a 365 ppm nel 1996, con

un tasso di incremento dello 0.5 % per anno. Secondo alcuni studiosi, se questo trend dovesse mantenersi, la concentrazione di CO₂ nel 21° secolo potrebbe raggiungere le 600 ppm. (OSTP,1997). Un raddoppio del livello della CO₂ atmosferica rispetto a quello che si aveva nel periodo preindustriale porterebbe ad un equilibrio nel riscaldamento globale tra gli 1,5 e i 4.5 °C (Mahlman, 1997).

Nel periodo 1995-2005 il tasso di aumento della concentrazione di CO₂ atmosferica è stato il più alto mai registrato a partire dal 1960, attestandosi intorno a 1.9 ppm per anno (media del periodo di riferimento) (IPCC, 2007).

La concentrazione di CO₂ atmosferica mostra delle variazioni stagionali; infatti la concentrazione massima si registra durante la primavera e la minima in autunno. Per la concentrazione di CO₂ esiste un gradiente tra l'emisfero nord e quello sud; questo può essere dovuto alla maggiore capacità di sink per la CO₂ dell'emisfero nord (Enquete Commission, 1992; Tans et al.,1990; Feeling et al.,1989).

La concentrazione atmosferica di metano nel 1996 era pari a circa 1.74 ppm, quasi il doppio del valore dell'era preindustriale. La concentrazione di CH₄ è aumentata dell'1% per anno tra il 1960 e il 1980 e il tasso di crescita attuale è di circa 0,8% per anno.

La concentrazione atmosferica di metano presenta una variazione stagionale pronunciata, con un massimo in primavera ed un minimo in autunno; tali variazioni sono determinate da fluttuazioni stagionali nelle fonti e nei sink. Inoltre, la dimensione dei sink è legata alla concentrazione nella troposfera del radicale OH. La produzione di metano da parte dei ruminanti varia da 30 a 45 l per kg di sostanza secca consumata (Shibata, 1994). L'emissione di metano da parte delle risaie varia da 0.01 a 1.4 g/m² al giorno (Sass, 1994).

Oltre all'effetto di radiative forcing, il metano ha un potere indiretto sul riscaldamento globale a causa del suo ruolo nella formazione fotochimica dell'ozono che influenza la concentrazione di altri gas ad effetto serra; l'ossidazione del CH₄ nella stratosfera porta alla formazione di vapore acqueo che incrementa il riscaldamento globale. L'effetto indiretto del metano sul riscaldamento globale è pari a circa 2/3 del suo effetto diretto.

L' incremento della concentrazione di N₂O in atmosfera, verificatosi tra l'epoca preindustriale ed il 2005 (IPCC, 2007), è causato principalmente dalla

fertilizzazione, dall'incendio delle biomasse e dai processi biotici nei suoli forestali. Diverse stime mostrano che da 0.17 a 3.52 kg di N₂O possono essere emessi in atmosfera ogni 100 kg di N distribuito col fertilizzante (CAST, 1992). L'uso complessivo di fertilizzanti adottati è di circa 80 milioni di tonnellate per anno nel mondo (FAO, 1992).

1.2 RUOLO DELL'AGRICOLTURA NELL'EMISSIONE DI GAS AD EFFETTO SERRA E POSSIBILI STRATEGIE DI MITIGAZIONE

L'attività agricola contribuisce al "radiative forcing" con effetti sia diretti che indiretti. Gli effetti diretti derivano dalle emissioni di CO₂, CH₄ e N₂O dovute alla deforestazione, all'allevamento dei ruminanti, alla decomposizione del carbonio organico del suolo a seguito delle lavorazioni e dalla coltivazione del riso in risaia, alla distribuzione di fertilizzanti chimici, all'uso di concimi organici e alla degradazione delle terre umide. Gli effetti indiretti derivano dall'emissione di N₂O, NO_x e NH₃ dovute all'attività microbica nel suolo e al passaggio di questi gas in atmosfera a seguito dell'irrigazione post fertilizzazione.

I cambiamenti nell'utilizzo del suolo hanno trasformato grandi aree da ecosistemi relativamente stabili in agroecosistemi con gestione estensiva ed intensiva. L'introduzione dell'agricoltura, intesa come pulizia della zona, drenaggio, lavorazioni del terreno, coltivazione, sostituzione della vegetazione perenne con colture annuali e fertilizzazione, ha avuto un notevole impatto sui pool e sui flussi di carbonio attorno alla Terra. Nella fase iniziale di queste trasformazioni le maggiori immissioni di CO₂ nell'atmosfera avvenivano a causa della riduzione degli input di carbonio e dell'aumento dei disturbi al suolo. Le forti pressioni per l'ottenimento di produzioni sempre più elevate, hanno avuto come conseguenza una grave degradazione del suolo manifestatasi con l'erosione e con la perdita di nutrienti. Questi fenomeni persistono tuttora in diverse aree del mondo.

Appare di fondamentale importanza l'identificazione precisa delle fonti di emissione dei differenti gas ad effetto serra, al fine di sviluppare strategie di mitigazione efficaci, rappresentate da:

- adozione di metodi di gestione conservativi e ad alta efficienza energetica, in grado di ridurre il consumo di carburanti in agricoltura e le conseguenti emissioni di CO₂;
- aumento dell'efficienza nell'utilizzo dei fertilizzanti, attraverso la diminuzione delle perdite dovute ad erosione, lisciviazione e volatilizzazione. L'adozione di tecniche di gestione sito-specifiche (agricoltura di precisione) può rendere l'utilizzo dei fertilizzanti molto più efficiente;
- conservazione della qualità del suolo, dell'acqua e della vegetazione, al fine di assicurare la capacità di sink per l'assimilazione della CO₂.

La riduzione delle emissioni derivanti dalle attività agricole si attua attraverso il miglioramento della gestione del carbonio e dell'azoto negli agroecosistemi, utilizzando ad esempio le tecniche che permettono un maggior assorbimento dei fertilizzanti azotati da parte delle piante e consentono una riduzione delle emissioni di N₂O (Bouwman, 2001).

L'attenta gestione del suolo e l'adozione di appropriati sistemi colturali o di allevamento, possono rendere i suoli un'importante sink per il carbonio ed i sistemi colturali possono essere degli strumenti efficaci per mitigare il potere di riscaldamento globale di altre attività non agricole.

Da studi condotti da diversi autori emerge che i suoli forestali o investiti a pascolo, sottoposti ad un cambio nella destinazione d'uso, tendono a perdere dal 20 al 50% del contenuto originario di carbonio organico nei primi 40-50 anni di coltivazione (Campbell and Souster, 1982; Tiessen et al., 1982; Mann, 1985; 1986; Schimel, 1986; Johnson and Kern, 1991; Rasmussen and Parton, 1994; Houghton, 1995); le variazioni nel contenuto di carbonio organico che si verificano negli anni successivi sono invece determinate dal tipo di gestione del suolo e dai processi di erosione (Rasmussen and Collins, 1991).

1.3 IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUI SISTEMI NATURALI

1.3.1 Ecosistemi

Gli ecosistemi rivestono un'importanza fondamentale per l'ambiente; i cambiamenti climatici possono incidere sull'ubicazione geografica dei sistemi ecologici, sulla diversità delle specie che li compongono e sulla loro stessa esistenza.

L'impatto dei potenziali cambiamenti climatici sui flussi e sui pool di carbonio è molto complesso e difficile da prevedere; gli scienziati sostengono che per ogni grado centigrado di aumento della temperatura media annuale le zone di vegetazione possono spostarsi verso i poli da 200 a 300 km (IPCC,1990).

I sistemi ecologici sono dinamici, e sono costantemente influenzati dalla variabilità del clima; gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi saranno determinati dalla rapidità e dalla misura delle variazioni nei valori medi ed estremi dei fattori climatici, nonché dagli effetti diretti dovuti all'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, che potrebbero incrementare la produttività e l'efficienza nell'uso dell'acqua di alcune specie vegetali.

Gli effetti secondari del cambiamento climatico si ripercuoteranno sulle caratteristiche dei suoli e sui fattori di disturbo degli ecosistemi (es. incendi, insetti e patologie), che favoriranno alcune specie rispetto ad altre, portando ad un'alterazione nella composizione degli ecosistemi.

La resilienza di numerosi ecosistemi sarà probabilmente compromessa a causa del cambiamento climatico e delle perturbazioni ad esso associate (es. possibili inondazioni, siccità, incendi incontrollati, insetti, acidificazione degli oceani), nonché a causa di altri fattori collegati ai cambiamenti climatici a livello mondiale, quali ad esempio cambiamenti nell'uso del suolo, inquinamento, frammentazione dei sistemi naturali, sfruttamento eccessivo delle risorse ecc. (IPCC,2007).

Nel corso di questo secolo, il sequestro di carbonio da parte degli ecosistemi terrestri raggiungerà probabilmente un massimo prima della metà del secolo, per diminuire e, non è escluso, invertirsi (nel caso in cui le emissioni di gas serra continuassero con i tassi attuali o superiori, e fossero associate ad altre variazioni

di rilevanza mondiale, come i cambiamenti nell'uso del suolo), andando ad incidere pesantemente sul clima attuale.

Si stima, con buona probabilità, che dal 20 al 30% delle specie vegetali e animali saranno probabilmente esposte ad un maggiore rischio di estinzione, se l'aumento della media mondiale della temperatura supererà una soglia compresa tra 1.5 e 2.5°C.

Per aumenti superiori a tale soglia, e per le corrispondenti concentrazioni di CO₂ in atmosfera, le proiezioni indicano pesanti alterazioni nella struttura e nella funzionalità degli ecosistemi, nelle interazioni ecologiche e nell'ubicazione geografica delle specie, con conseguenze negative per la biodiversità (IPCC, 2007).

1.3.2 Risorse idriche

Le risorse idriche rappresentano una componente indispensabile per il benessere dell'umanità. Attualmente, 1300 milioni di persone non hanno adeguate disponibilità di acqua potabile e 2000 milioni non possono accedere ad un'adeguata igiene. Circa 19 Paesi (in particolare nel Medio Oriente e nel nord Africa) hanno attualmente gravi problemi nell'approvvigionamento idrico e ci si aspetta che un cambiamento climatico possa determinare l'incremento di queste cifre entro il 2025. La siccità rappresenta un problema tipico del clima dell'Africa; i cambiamenti climatici porteranno ad un aggravio di tale problematica e determineranno l'aumento delle piogge e di fenomeni estremi, quali inondazioni, in molte regioni a clima temperato ed umido.

1.4 EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULL'AGRICOLTURA

I cambiamenti climatici si ripercuotono sulla resa delle colture, in funzione del tipo di sistema colturale adottato.

Gli effetti diretti più importanti saranno determinati dalla variazione delle temperature, delle precipitazioni, della durata della stagione di coltivazione, dal verificarsi di fenomeni estremi e dal modificarsi dei periodi nei quali si raggiungono soglie critiche che influiscono sullo sviluppo delle colture.

L'aumento della concentrazione atmosferica della CO₂ potrebbe avere effetti positivi sulla crescita in molte colture.

Gli effetti indiretti potrebbero identificarsi con un aggravio della situazione fitosanitaria, in seguito all'aumento delle patologie e degli attacchi degli insetti, e con una maggiore presenza di infestanti.

In generale, alle alte e medie latitudini si potrebbe verificare un aumento della produttività delle colture, a seconda del tipo e della stagione di coltivazione, una variazione nel regime delle temperature e la stagionalità delle precipitazioni. Ai tropici, dove alcune colture sono attualmente esposte ai massimi di temperatura tollerata, e dove predominano i sistemi colturali non irrigui, è probabile che si verifichi una diminuzione delle rese. (IPCC,1997).

Nel quarto rapporto dell'IPCC sui cambiamenti climatici si evidenzia che la produttività di alcune colture aumenterà leggermente alle medie ed alte latitudini, per effetto dell'aumento della temperatura da 1 a 3 °C. Alle latitudini inferiori, specialmente in regioni secche e tropicali, la produttività delle colture diminuirà in seguito all'aumento di temperatura stimato tra 1 e 2°C.

Nello specifico, gli effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura si traducono in:

- Alterazione dello sviluppo fenoculturale con modificazione dei ritmi stagionali di crescita (es. per le specie erbacee, epoca di germinazione e di emergenza);
- Carente soddisfacimento delle esigenze "in freddo" (alterazione della fioritura dei fruttiferi);
- Anticipazione della raccolta sia per le specie erbacee che per quelle arboree;
- Possibile peggioramento della qualità dei prodotti e diminuzione delle rese;
- Possibili difficoltà nella ricerca ed adozione di tecniche colturali adeguate;
- Maggiore incidenza dei processi di degrado dei suoli e perdita di fertilità (erosione, dilavamento dei nutrienti, ecc.);
- Aumento dei fabbisogni irrigui, in coincidenza di minore (e più costosa) disponibilità idrica;

- Maggiore difficoltà di rinnovo delle risorse idriche;
- Aumento del carico di parassiti e del numero delle loro generazioni nella stagione colturale;
- Introduzione ed acclimatemento di nuovi parassiti;
- Maggiore competizione esercitata dalla flora infestante;
- Maggiore possibilità di intrusione del cuneo salino (salinizzazione delle falde e dei terreni).

1.5 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Per contrastare il riscaldamento globale la comunità mondiale deve necessariamente sviluppare degli obiettivi a lungo termine per stabilizzare la concentrazione di tutti i gas serra. Uno scenario “business-as-usual” porterebbe ad un arricchimento di CO₂ in atmosfera sino a 700 ppm nel 2100 (OSTP,1997). Ridurre o invertire questo rapido incremento richiede non solo una riduzione delle emissioni di CO₂ ma anche l’aumento del sequestro di CO₂ sotto forma di sostanza organica nel suolo e negli ecosistemi terrestri ed acquatici.

Nell’articolo 2 del Protocollo di Kyoto, vengono indicate le misure di mitigazione aventi l’obiettivo di promuovere uno sviluppo sostenibile; tali misure contemplano:

- miglioramento dell’efficacia energetica in settori rilevanti dell’economia nazionale;
- protezione e miglioramento dei meccanismi di rimozione e di raccolta dei gas ad effetto serra, nel rispetto degli impegni assunti in sede di accordi internazionali ambientali;
- promozione di metodi sostenibili di gestione forestale, di imboscamento e di rimboscamento;
- promozione di forme sostenibili di agricoltura, alla luce delle considerazioni relative ai cambiamenti climatici;
- ricerca, promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di forme energetiche rinnovabili, di tecnologie per la cattura e l’isolamento del

biossido di carbonio e di tecnologie avanzate ed innovative compatibili con l'ambiente;

- riduzione progressiva, o eliminazione graduale delle imperfezioni del mercato, degli incentivi fiscali, delle esenzioni tributarie e dei sussidi, in contrasto con l'obiettivo della Convenzione, in tutti i settori responsabili di emissioni di gas ad effetto serra, e applicazione di strumenti di mercato;
- incoraggiamento di riforme appropriate nei settori pertinenti, al fine di promuovere politiche e misure che limitino o riducano le emissioni dei gas ad effetto serra non incluse nel Protocollo di Montreal;
- adozione di misure volte a limitare e/o ridurre le emissioni di gas ad effetto serra non inclusi nel Protocollo di Montreal nel settore dei trasporti;
- limitazione e/o riduzione delle emissioni di metano attraverso il suo recupero ed utilizzazione nel settore della gestione dei rifiuti, come pure nella produzione, trasporto e distribuzione di energia.

Di seguito verrà approfondito il potenziale di mitigazione del mutamento climatico derivante dalle attività agricole.

1.5.1 Strategie per la mitigazione dei cambiamenti climatici: ruolo del settore agricolo

Il settore agricolo e forestale è stato coinvolto nelle strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici grazie al suo ruolo fondamentale di “assorbitore” (*sink*) di carbonio. Le piante, infatti, assorbendo anidride carbonica nel processo di fotosintesi, consentono di fissare temporaneamente il carbonio nella biomassa, nella lettiera e nel suolo, a loro volta considerati delle vere e proprie riserve di carbonio (*carbon stocks*) del pianeta. Nel settore primario sono tre le possibili linee di azione relative al ciclo del carbonio:

- 1 conservazione delle riserve di carbonio attraverso la protezione dei suoli, delle coltivazioni e delle foreste esistenti;
- 2 aumento delle riserve di carbonio biologico attraverso una migliore gestione delle attività nel settore (ad esempio: aumento degli stock forestali, miglioramento delle tecniche di lavorazione dei suoli,

riduzione dei prelievi di biomasse legnose, prevenzione degli incendi) e attraverso i cambiamenti di uso del suolo (piantagioni forestali su terreni agricoli, rivegetazione di terreni sterili e improduttivi ecc.);

3 sostituzione di combustibili fossili con le biomasse.

Tra le tecniche per la rimozione dei gas serra dall'atmosfera, rientrano tutte le pratiche agricole che determinano un incremento dell'accumulo di carbonio attraverso l'attività fotosintetica e/o rallentano il rilascio (per processi di respirazione, erosione o combustione) del carbonio immobilizzato nel terreno. Queste tecniche hanno come obiettivo l'accumulo della CO₂ atmosferica nel terreno sotto forma di sostanza organica, con formazione dei cosiddetti "sink" di carbonio (IPCC, 2007).

L'uso dei terreni agricoli come serbatoi (sink) della CO₂ in eccesso, è una misura prevista dall'art. 3.4 del Protocollo di Kyoto, ed è stata inclusa nella Delibera CIPE del 19.12.2002 "Revisione delle linee guida per le politiche e misure nazionali di riduzione delle emissioni dei gas serra" conseguente alla Legge 120/2002 di ratifica del Protocollo di Kyoto.

Il suolo rappresenta, infatti, il maggiore serbatoio terrestre di carbonio organico dopo i giacimenti fossili. Stime riportate in letteratura attribuiscono al suolo un contenuto di carbonio variabile tra i 1400 e i 1600 Pg (1 Pg=10¹⁵ g), rispetto ai 4.000 Pg dei combustibili fossili, ai 700 Pg presenti nell'atmosfera ed ai 600 Pg stimati per gli organismi vegetali terrestri. (Post et al., 1982; Eswaran et al., 1993. Diversi studi hanno dimostrato che l'adozione di appropriate tecniche agronomiche, individuate in funzione delle condizioni locali, possa consentire l'accumulo di grandi quantità di carbonio nel terreno (Lal, 2004a); inoltre, una quantità significativa di carbonio può essere accumulata dai sistemi agroforestali nei tessuti vegetali delle piante (Albrecht e Kandji, 2003).

Tutte le tecniche agronomiche che determinano un aumento della resa e un maggiore input di carbonio al terreno, quali ad esempio l'utilizzo di varietà migliorate che permettono di ottenere maggiori produzioni e l'adozione della rotazione delle colture (in particolare con specie perenni che sono in grado di dislocare una maggiore quantità di carbonio nel suolo), possono determinare un aumento dell'accumulo di carbonio nel terreno (Follett, 2001). In particolare, le

rotazioni dovrebbero prevedere l'utilizzo di specie leguminose (West e Post, 2002; Izaurre et al., 2001), che consentono di ridurre la quantità di azoto distribuito alle colture in successione.

I sistemi colturali che prevedono la presenza di "cover-crops" tra i filari delle colture arboree o dei vigneti sono efficaci nell'incremento della capacità di sink dei terreni agricoli; le cover-crops infatti, permettono di incrementare la quantità di carbonio immagazzinata dal sistema (Barthès et al., 2004; Freibauer et al., 2004).

Altre tecniche colturali efficaci nella mitigazione dei mutamenti climatici sono quelle che prevedono un'attenta gestione delle lavorazioni del terreno e dei residui colturali. Per molte colture è possibile adottare tecniche definite di "minima lavorazione" o di "non lavorazione"; tali tecniche sono in grado, in alcuni casi, di determinare un incremento della quantità di carbonio immagazzinata nel terreno (West and Post, 2002; Ogle et al., 2005; Gregorich et al., 2005; Alvarez 2005), in quanto evitano o generano un minimo disturbo al sistema suolo, riducendo la perdita di carbonio generata da fenomeni di decomposizione ed erosione (Madari et al., 2005). Inoltre l'adozione della non lavorazione consente un'ulteriore riduzione nell'emissione di CO₂ grazie al risparmio energetico dovuto al ridotto numero di lavorazioni effettuate (Marland et al., 2003b; Koga et al., 2006).

Uno dei metodi più efficaci nella riduzione delle emissioni di gas serra è rappresentato dalla conversione delle terre ad uso agricolo in uso alternativo, o dalla riconversione delle stesse alla loro situazione originaria. Tale strategia è basata sulla conversione colturale di alcune aree agricole in colture "energetiche" e sul ripristino della vegetazione naturale nelle aree agricole marginali, caratterizzate dal degrado del suolo dovuto a diversi processi come ad esempio erosione, salinizzazione e riduzione della fertilità. La conversione di un terreno arato in un pascolo, determina un accumulo di carbonio nel suolo grazie alla riduzione del disturbo causato dalle lavorazioni e alla riduzione dell'asportazione di carbonio derivante dalla raccolta del prodotto (IPCC, 2000). Appare di fondamentale importanza, per l'aumento della capacità di sink dei terreni investiti a pascolo, una gestione ottimale del pascolamento; l'intensità e la frequenza del pascolamento possono determinare la riduzione o l'aumento del contenuto di

carbonio del pascolo, e la sua composizione floristica (Conant et al., 2001; 2005; Freibauer et al., 2004; Conant and Paustian, 2002; Reeder et al., 2004). Diversi studi dimostrano che l'accumulo di carbonio in un pascolo gestito in maniera ottimale è spesso maggiore di quanto si registri in un pascolo non utilizzato o sovrapascolato (Liebig et al., 2005; Rice and Owensby, 2001).

L'adozione delle migliori pratiche agricole (BPM) può determinare l'aumento della capacità di sink delle aree coltivate e, allo stesso tempo, la riduzione delle emissioni di N_2O e CH_4 (CAST, 1992). L'incremento della capacità di sink è dovuta all'eliminazione delle perdite di carbonio per ossidazione, metanogenesi ed erosione, nonché all'incremento contemporaneo di carbonio attraverso la fissazione e la stabilizzazione.

Le BPM sono specifiche per differenti tipi di suolo e regione ecologica; comprendono le lavorazioni conservative, la gestione ottimale dei residui colturali, l'incremento dell'efficacia di acqua e fertilizzanti attraverso la riduzione delle perdite, l'incremento dell'intensità di coltivazione (attraverso l'eliminazione della non coltivazione estiva) e l'utilizzo, dove possibile, delle cover-crops. La gestione ottimale dei residui colturali è importante per l'incremento del contenuto di carbonio organico del suolo, della qualità del suolo, della produzione di biomassa e per la riduzione delle emissioni di CO_2 .

1.5.2 Strategie di gestione sostenibili

Il concetto di agricoltura sostenibile deve includere l'incremento di produttività agronomica, il miglioramento della conservazione delle risorse e il miglioramento della qualità dell'ambiente. L'immobilizzazione del carbonio nel suolo rappresenta un aspetto importante dell'agricoltura sostenibile. Un uso sostenibile delle terre deve essere valutato in termini di impatto sui pool di carbonio organico del terreno; un trend positivo per tali pool è indice di un sistema sostenibile di uso e gestione del suolo. La sostenibilità agricola e la qualità del suolo sono infatti strettamente collegati.

L'obiettivo dell'agricoltura dovrebbe essere quello di adottare usi del suolo e sistemi di gestione colturale in grado di determinare un incremento della quantità di carbonio nel terreno e limitare le emissioni di gas ad effetto serra; la strategia di

base per raggiungere tale scopo è rappresentata dal miglioramento e dal mantenimento della qualità del suolo.

La qualità del suolo può essere definita come “la capacità del suolo di sostenere la produttività biologica degli ecosistemi, mantenere la qualità dell’ambiente e promuovere il benessere delle piante e degli animali” (Doran and Parkin, 1994).

Alcuni studiosi (Bezdicsek et al., 1996) mettono in evidenza una stretta correlazione tra qualità del suolo e immobilizzazione di carbonio e tra qualità del suolo ed effetto serra; l’emissione di gas serra e l’immobilizzazione di carbonio nel suolo sono influenzati dalle proprietà e dai processi che avvengono nel suolo.

Unger (1995 a, b) ha osservato un miglioramento delle condizioni della superficie del suolo in seguito ad un incremento del suo contenuto di carbonio organico. Il miglioramento della qualità del terreno indotto dall’aumento del contenuto di carbonio organico determina un aumento della produzione di biomassa, la quale, a sua volta, dà luogo ad un ulteriore arricchimento del contenuto di carbonio organico.

In definitiva, il miglioramento della qualità del suolo attraverso l’aumento del suo contenuto di carbonio organico, può invertire il trend della degradazione, garantire un aumento della biomassa prodotta dagli ecosistemi e mitigare l’effetto serra.

L’adozione di pratiche colturali ecocompatibili, quali ad esempio il ricorso ai concimi organici, le lavorazioni conservative e la rotazione con specie foraggere e leguminose, può modificare l’equilibrio del contenuto di carbonio organico del terreno, eliminando o minimizzando i processi che conducono alla degradazione del suolo.

Appare di fondamentale importanza l’identificazione delle tecniche più appropriate per la gestione del suolo, dell’acqua e delle risorse naturali in generale; è inoltre necessario promuovere, attraverso politiche che possano facilitare la loro adozione, l’utilizzo delle suddette tecniche, dando priorità a quelle aventi un elevato potere di riduzione delle emissioni di CO₂ e di incremento dell’immobilizzazione del carbonio nel suolo (Cole, 1995).

2. LA SOSTANZA ORGANICA NEL TERRENO

2.1 IL SUOLO COME SINK DI CARBONIO

I sistemi ecologici terrestri, per mezzo dei quali il carbonio viene stoccato nella biomassa viva, nella materia organica in decomposizione e nel suolo, svolgono un ruolo importante nel ciclo del carbonio a livello globale. Il carbonio viene scambiato naturalmente tra questi sistemi e l'atmosfera mediante i processi di fotosintesi, respirazione, decomposizione e combustione. Le attività antropiche quali i cambi nell'uso del suolo e la gestione dei sistemi agrari, alterano la quantità di carbonio depositato nei sink e gli scambi tra questi e l'atmosfera.

Nel corso degli ultimi secoli sono state liberate quantità elevate di carbonio in seguito al disboscamento avvenuto dapprima alle alte e medie latitudini e nell'ultima parte del XX secolo nei tropici.

Tabella 1.1 - Quantità di carbonio presente nella vegetazione e nel suolo (fino ad 1 metro di profondità) dei principali ecosistemi mondiali

Bioma	Área (10 ⁹ ha)	Carbono mundial almacenado (Gt C)		
		Vegetación	Suelo	Total
Bosques tropicales	1.76	212	216	428
Bosques templados	1.04	59	100	159
Bosques boreales	1.37	88	471	559
Sabanas tropicales	2.25	66	264	330
Herbazales templados	1.25	9	295	304
Desiertos y semidesiertos	4.55	8	191	199
Tundra	0.95	6	121	127
Humedales	0.35	15	225	240
Tierras de cultivo	1.60	3	128	131
Total mundial	15.12	466	2011	2477

Nota: Aunque existe una incertidumbre considerable con respecto a las cifras indicadas, dada la ambigüedad de las definiciones de bioma, esta tabla proporciona sin embargo una panorámica general de la magnitud del carbono almacenado en los sistemas terrenos.

Il carbonio viene stoccato sia nella vegetazione che nei suoli; la quantità di carbonio immobilizzato è molto maggiore nei suoli che nella vegetazione, in particolare negli ecosistemi forestali delle latitudini medie ed alte (tabella 1.1). (IPCC, 2000).

La pedosfera rappresenta lo strato più esterno della crosta terrestre e supporta tutte le attività vitali, giocando un ruolo cruciale nel ciclo globale del carbonio.

La quantità di carbonio presente in un ecosistema nativo riflette la capacità di sink per il carbonio dell'ecosistema stesso (Zhang et.al., 2007). Diversi processi della pedosfera (quali ad esempio l'umificazione, l'aggregazione, la traslocazione all'interno della pedosfera e l'approfondimento radicale) influenzano l'immobilizzazione del carbonio nel suolo ed all'interno degli ecosistemi. Il contenuto di carbonio organico in ogni punto del suolo è il risultato dell'equilibrio tra diversi processi che ne determinano l'emissione e l'immobilizzazione. L'emissione di carbonio dal suolo verso l'atmosfera è favorita dall'erosione, dalla lisciviazione, dalla metanogenesi e dalla volatilizzazione e mineralizzazione, mentre la sua immobilizzazione nel suolo è incrementata dall'umificazione, dall'aggregazione, dalla calcificazione e dalla stratificazione o immobilizzazione profonda.

Le piante rappresentano il principale produttore di energia, essendo in grado di sintetizzare carboidrati a partire dalla CO₂ e dall'energia solare ed assorbendo gli elementi nutritivi essenziali e l'acqua dal terreno. La maggior parte della CO₂ assorbita rientra in atmosfera in seguito alla respirazione delle piante e degli animali e alla decomposizione microbica. I microrganismi giocano un ruolo cruciale nel ciclo del carbonio e la comprensione dei processi microbici che avvengono a livello di pedosfera è fondamentale per identificare ed adottare strategie di mitigazione efficaci.

Come conseguenza dell'immobilizzazione di una frazione della CO₂ assorbita dalle piante all'interno degli ecosistemi terrestri ed acquatici, si osserva la diminuzione della concentrazione totale della CO₂ in atmosfera.

Il suolo rappresenta il principale mezzo di connessione tra le attività biotiche ed abiotiche, interagendo con l'atmosfera, l'idrosfera, la biosfera e la litosfera.

I cicli dei diversi elementi all'interno di un ecosistema sono tra loro strettamente dipendenti al punto che l'alterazione di uno di questi può provocare conseguenze anche in altri; ad esempio, un disturbo nel ciclo idrologico, causato dall'aumento della quantità di acqua persa per ruscellamento, determina un aumento dell'erosione del suolo che a sua volta provoca una perdita di carbonio, azoto e altri elementi nutritivi dal terreno.

L'agricoltura ha un ruolo chiave nella mitigazione dei mutamenti climatici poiché, a seconda della destinazione d'uso e della gestione colturale, il suolo può essere considerato un sink oppure una fonte di emissioni di CO₂ in atmosfera.

E' necessario comprendere le interazioni biotiche ed abiotiche tra il suolo, le piante, gli animali e i microrganismi, per l'adozione di strategie volte ad incrementare la capacità di sink per il carbonio del suolo e degli ecosistemi terrestri ed acquatici e per la riduzione delle emissioni e delle perdite di carbonio ed azoto dagli ecosistemi.

La frazione organica del suolo è estremamente eterogenea e viene tradizionalmente distinta in tipi, classi e frazioni. La classificazione in "tipi" deriva soprattutto dall'esame micromorfologico e si possono distinguere sei tipi di sostanza organica (s.o.):

- Mull calcico;
- Mull forestale;
- Moder;
- Mor;
- Ammoor;
- Torba oligofitica.

Di interesse più generale è la classificazione della s.o. in quattro classi:

1. Organismi viventi;
2. Sostanze organiche non ancora decomposte, rappresentate dalla lettiera, dalle radici morte, dagli apporti radicali e dalle spoglie della microflora e della pedofauna;
3. Costituenti in via di trasformazione, nei quali l'organizzazione dei tessuti e delle cellule appare ancora chiaramente riconoscibile e tende a divenire meno netta man mano che i processi di decomposizione avanzano;

4. Sostanze umificate e costituenti accessori, costituite da composti sintetizzati o profondamente trasformati dagli organismi del suolo.

I costituenti della frazione organica del suolo derivano dai residui postmortali sia di origine vegetale che animale, rappresentati essenzialmente da carboidrati, amminoacidi e proteine, lipidi, acidi nucleici, lignine, cere, resine ed altri costituenti minori.

L'eterogeneità dei materiali organici presenti nel suolo, la varietà di organismi coinvolti nella loro trasformazione e il gran numero di fattori ambientali che influenzano i vari processi rendono alquanto difficile la conoscenza delle sostanze umiche ad un livello molecolare.

È abbastanza difficile delineare correttamente le varie tappe che regolano i flussi del carbonio nel suolo in quanto non è facile distinguere i processi di degradazione dei residui vegetali dai processi di mineralizzazione delle sostanze umiche che ne derivano; di seguito viene fatta una suddivisione generale in quattro fasi, rappresentate dagli apporti organici al suolo, dalla loro degradazione, dalle polimerizzazioni e resintesi e dalla mineralizzazione.

2.2 GLI APPORTI ORGANICI

Gli apporti di carbonio organico al suolo sono dovuti alla fase finale del catabolismo o all'abbandono delle spoglie degli organismi viventi; i più importanti sono quelli derivanti dalle radici delle piante.

Il rilascio di carbonio organico radicale nel suolo è influenzato da tre fattori:

1. presenza di organismi viventi;
2. stress (idrici, nutrizionali ecc.);
3. contatto con le superfici solide (che esercitano un'azione abrasiva o anche solo un impedimento meccanico).

Gli apporti organici radicali al suolo rappresentano sempre più del 20% del peso secco totale della pianta e sono stimati tra il 20 e il 40% dei fotosintetati totali in molte colture erbacee (Sequi, 1989).

Gli apporti organici derivanti dall'apparato aereo delle piante sono rappresentati dalla chioma delle piante nei suoli forestali, e dai residui colturali nei suoli agrari.

Altri apporti organici sono quelli di natura animale, umana e ad opera dei microrganismi.

2.3 DEGRADAZIONE, RESINTESI E POLIMERIZZAZIONI

I processi di degradazione riducono i materiali organici pervenuti al suolo in molecole di piccole dimensioni. La velocità di degradazione dei diversi materiali organici è strettamente legata alle caratteristiche fisiche e chimiche dei loro costituenti. Processi di degradazione sono condotti dapprima dalla pedofauna (triturazione e amminutamento dei residui) e successivamente dalla microfauna del suolo.

Le condizioni ambientali sono determinanti nel processo di degradazione; l'influenza principale è rappresentata dalle condizioni ossidoriduttive del suolo. In caso di aerobiosi la degradazione conduce alla prevalente formazione di anidride carbonica, di cellule microbiche e di energia, mentre in condizioni di anaerobiosi si sviluppano processi fermentativi che bloccano la degradazione a stadi intermedi delle ossidazioni, con produzione di metano e ridotta formazione di cellule microbiche e di energia.

I processi di umificazione consistono nella formazione di molecole di dimensioni relativamente grandi nel corso di resintesi e polimerizzazioni.

2.4 IL TURNOVER DELLA SOSTANZA ORGANICA

Il turnover è rappresentato dalla velocità di riciclaggio del carbonio organico e fornisce una indicazione del periodo di permanenza di quest'ultimo nel suolo. Il turnover è un dato molto importante ai fini pratici perchè consente di valutare l'effetto di diversi fattori, quali ad esempio le pratiche agronomiche, sulle scorte di s.o. nel suolo. La s.o. nel terreno tende ad evolvere verso la mineralizzazione; la velocità di tali processi è influenzata da diversi fattori quali:

- tipo di materiale organico di partenza;
- tipo di suolo;
- clima;
- attività antropiche.

Il tipo di s.o. di partenza dipende sostanzialmente dal tipo di vegetazione che influenza sia la biomassa prodotta che la composizione della s.o. di partenza le quali, a loro volta, influenzano il tipo e l'attività della microflora e della microfauna presenti nel terreno.

Altro fattore importante nell'evoluzione della s.o. è rappresentato dal tipo di suolo; questo infatti ha un ruolo fondamentale in relazione alla tessitura, al pH, al rapporto aria/acqua contenuta.

I fattori climatici più importanti per il turnover del carbonio sono rappresentati dalle precipitazioni e dalla temperatura. Questi intervengono sia nel determinare il tipo di s.o. e la quantità prodotta annualmente, che nell'orientare la sua evoluzione nel terreno; ad esempio, un clima caldo arido favorisce un'intensa ossidazione della s.o. e quindi la rapida mineralizzazione.

Per quanto riguarda le attività antropiche, il sistema colturale prescelto e la sua gestione giocano un ruolo molto importante sulle scorte di carbonio del suolo.

3. APPROCCI METODOLOGICI PER L'ANALISI DEI DATI AMBIENTALI

3.1 LA VARIABILITÀ SPAZIALE DEI DATI AMBIENTALI

L'ambiente si estende in maniera continua su tre dimensioni e le sue proprietà sono il risultato delle interazioni di differenti fattori, ognuno dei quali può operare da solo o relazionato con altri, simultaneamente su diverse scale, in maniera lineare o non lineare. L'ambiente è il risultato di tali processi e varia in maniera complessa da luogo a luogo.

Le proprietà dell'ambiente sono in relazione fra loro in una qualche scala; questa relazione è definita "autocorrelazione". Questo significa che luoghi vicini tra loro tendono ad avere comportamenti simili e luoghi lontani tendono ad avere comportamenti differenti.

Poichè la realtà varia da un punto all'altro e non esiste la possibilità né la convenienza di effettuare osservazioni in ogni punto, è necessario definire dei metodi che consentano di stimare il valore di una data variabile in un punto in cui questa non è stata campionata, a partire dai valori registrati in altre postazioni. Esistono diversi studi condotti al fine di comprendere il fenomeno della eterogeneità naturale a scale differenti; ciò è dovuto all'importanza che la variabilità spaziale assume in tutti gli studi ambientali (Webster, 1985; Christakos, 1992; Cressie, 1991; Goovaerts, 1999; Castrignanò et al., 2000a).

La variabilità di una proprietà osservabile in un dato territorio è strettamente legata alla scala di osservazione del fenomeno, infatti alla sua strutturazione contribuiscono fattori e processi di tipo diverso, interagenti fra loro su scale differenti sia spaziali che temporali. La variabilità spaziale è fortemente influenzata dalla scala di osservazione prescelta e dalla metodologia adottata, oltre che dalla variabile presa in esame.

Attualmente, esistono numerosi risultati sperimentali (Oliver e Webster, 1986; McBratney et al., 1991; Castrignanò et al., 2000a) che attestano come spesso questa variabilità casuale contenga in realtà una componente strutturale, dipendente cioè dallo spazio; per cui, almeno entro un determinato raggio di influenza, le differenze spaziali fra le proprietà dei suoli possono essere espresse,

anziché in termini assoluti, in funzione della distanza di separazione fra i punti di campionamento.

Recenti sviluppi della teoria statistica consentono di quantificare l'interdipendenza spaziale fra i campioni e di utilizzare tale informazione per la fase successiva di interpolazione, aumentando la precisione della stima. Questa moderna evoluzione dell'approccio statistico si basa, essenzialmente, sulla *teoria delle variabili regionalizzate* (Isaak e Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997), che è attualmente applicata con successo in diverse materie, in particolare nelle scienze del suolo e ambientali (Goovaerts e Journel, 1995; Castrignanò et al., 2000a,b; Wackernagel, 2003).

La variazione spaziale delle caratteristiche del suolo racchiude componenti sia sistematiche (o deterministiche) che casuali. La variabilità sistematica consiste in un cambiamento graduale e ben definito ("trend"), che può essere interpretato in termini di fattori che agiscono ad una scala più grande di quella di osservazione (topografia, litologia, clima, età dei suoli, composizione fisico-chimica, etc.).

Oltre a questa componente della variazione, vi sono anche delle differenze che non possono essere attribuite a cause note, ricadenti cioè sotto il diretto controllo dello sperimentatore: questa parte dell'eterogeneità globale che sfugge all'interpretazione viene chiamata casuale.

La variabilità spaziale è il risultato di diversi fattori che interagiscono su di un continuum spazio-temporale: nel caso dei suoli, si possono identificare i fattori che operano su grandi distanze (fattori pedogenetici) e per lunghi periodi di tempo (clima), che vengono a loro volta modificati da altri processi che agiscono a più breve distanza spaziale (erosione e successivo deposito del materiale originario) o temporale (fattori meteorologici).

Questa natura tipicamente gerarchizzata ("nested") della variabilità naturale fa sì che l'individuazione del tipo e delle cause della variazione delle proprietà dei suoli dipendano sensibilmente dalla scala di osservazione e dall'intensità di campionamento.

3.2 APPROCCI GEOSTATISTICI

L'approccio geostatistico è da ricondursi alla modellistica stocastica che consiste nel modellizzare un fenomeno mediante una Funzione Aleatoria caratterizzata da una legge spaziale.

La geostatistica, rispetto alla statistica classica, consente di studiare i fenomeni naturali, in cui occorre tenere conto della dipendenza spaziale tra le osservazioni. La geostatistica rappresenta pertanto una metodologia per descrivere la continuità spaziale, caratteristica fondamentale di molti fenomeni naturali; inoltre si avvale di tecniche avanzate di regressione lineare e non lineare utili allo studio e all'elaborazione di mappe tematiche per una o più variabili spaziali mediante i metodi di kriging, inverso della distanza, vicinaggio ed altri metodi. In questo modo, l'approccio geostatistico consente di stimare i valori di una variabile spaziale in punti non campionati, fornendo la probabilità associata all'errore di tale stima;

La geostatistica può essere utilizzata inoltre per migliorare l'efficienza delle strategie di campionamento, con l'obiettivo di ottenere la massima informazione con il minimo numero di campioni. Infatti, nello studio della variabilità spaziale, il campionamento può avere un'elevata influenza sui risultati attesi.

Lo studio geostatistico consente quindi di caratterizzare un fenomeno secondo dimensioni spaziali o spazio-temporali. In questo contesto, è possibile affrontare lo studio qualitativo e quantitativo della variabilità di un determinato fenomeno, specificandone le caratteristiche in relazione alla presenza di eventuali anisotropie (direzione preferenziale di un fenomeno) ed alla esistenza di diverse scale di variabilità, spaziali o temporali. Poiché la variabilità dei fenomeni naturali è generalmente caratterizzata dalla presenza di numerose variabili, può essere molto utile applicare le tecniche della statistica multivariata, quali l'Analisi delle Componenti Principali e l'analisi Cluster. In tale maniera, si possono mettere in evidenza particolari comportamenti, che interessano gruppi di variabili o di individui, che possono essere riconducibili a fenomeni che hanno agito a scale spaziali differenti.

Le caratteristiche fondamentali dei dati geostatistici sono la *non ripetitività* e la *dipendenza*, ovvero in ogni punto campionato esiste una sola osservazione e, in generale, i valori osservati in due punti diversi sono tra loro dipendenti.

Lo studio geostatistico si sviluppa attraverso le seguenti fasi:

- Descrizione del fenomeno oggetto di studio: analisi esplorativa dei dati (calcolo della media, varianza, coefficiente di variazione, ecc.);
- Stima di una misura opportuna (di solito il semivariogramma) per identificare la correlazione spaziale tra le osservazioni;
- Ricerca di un modello teorico che descriva la correlazione spaziale;
- Studio dei diagrammi a dispersione per identificare la presenza di valori anomali che disturbano la stima della correlazione spaziale;
- Stima della variabile spaziale in punti non campionati mediante un metodo di interpolazione stocastica (kriging) che fornisce anche una stima dell'errore associato al valore stimato;
- Elaborazione di mappe che visualizzano il comportamento della variabile spaziale nell'intero dominio di studio.

3.3 STUDIO DELLA CORRELAZIONE SPAZIALE

Data una serie di campioni, le tecniche dell'analisi statistica classica ipotizzano che tutti i campioni appartengano casualmente ed indipendentemente ad una semplice distribuzione di probabilità; questa ipotesi viene detta "stazionaria". Tale approccio non assume alcuna conoscenza sulla posizione dei campioni o delle relazioni esistenti fra loro.

La geostatistica ipotizza invece che la distribuzione delle differenze tra due campioni diversi è la stessa per tutta l'area di campionamento e dipende solamente dalla distanza e dall'orientamento tra i due punti. Questa ipotesi è detta "quasi stazionaria".

Osservando un fenomeno naturale si nota come esso sia spesso caratterizzato dalla distribuzione nello spazio di una o più variabili dette variabili regionalizzate (VR). Se $z(x)$ rappresenta il valore della variabile z nel punto x , il problema consiste nel rappresentare la variabilità della funzione $z(x)$ nello spazio (cioè come varia z al variare di x).

In geostatistica, ogni valore $z(x_i)$ viene considerato come una particolare realizzazione di una variabile aleatoria $Z(x_i)$ nel punto x_i . La serie delle VA $Z(x)$ (con x che varia all'interno del dominio D) costituisce una funzione aleatoria (FA).

La funzione aleatoria è una funzione che, in seguito ad una prova, può assumere una forma concreta, detta realizzazione della FA. Se si eseguono una serie di prove su una FA si ottiene una famiglia di realizzazioni. Un esempio di FA del tempo è rappresentata dal valore della temperatura dell'aria $T(t)$ misurata in una giornata. Se si registrano i valori della temperatura in diversi giorni di una medesima stagione in funzione del tempo, si ottiene una famiglia di realizzazioni di questa FA (figura 3.1).

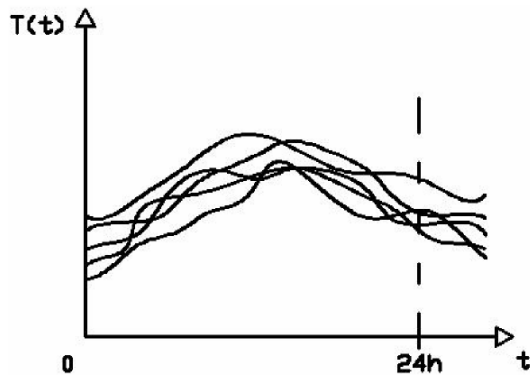


Figura 3.1 - Realizzazioni di una FA

Se si considera una certa FA $X(t)$ e si suppone che essa sia soggetta ad n prove indipendenti che forniscono n realizzazioni $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ in seguito a ciascuna prova la FA $X(t)$ si trasforma in una funzione non aleatoria. Se si fissa un certo valore dell'argomento t e si segue l'andamento della FA $X(t)$ essa diventa una VA nel senso stretto del termine. Tale VA si definisce funzione della sezione aleatoria corrispondente ad un t dato.

Se si traccia la sezione di una famiglia di realizzazioni per un t dato (figura 3.2) si ottengono n valori assunti dalla VA $X(t)$ in n prove.

Una FA $X(t)$ possiede le proprietà sia di una VA sia di una FA, a seconda che essa sia esaminata in tutto l'intervallo di variazione di t o per un valore fissato del tempo.

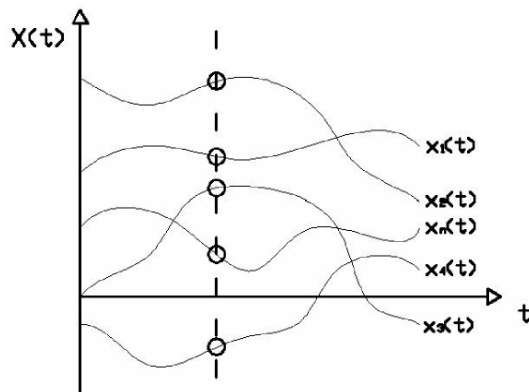


Figura 3.2 - Sezione della FA $X(t)$

La *speranza matematica* di una FA $X(t)$ è una funzione non aleatoria $m_x(t)$ che, per ogni valore dell'argomento t è uguale alla speranza matematica della sezione corrispondente della FA:

$$m_x(t) = M[X(t)] = \frac{\sum_{i=1}^N X_i(t)}{N}$$

dove N indica il numero di realizzazioni.

La speranza matematica perciò è una funzione media attorno alla quale variano le diverse realizzazioni concrete della FA.

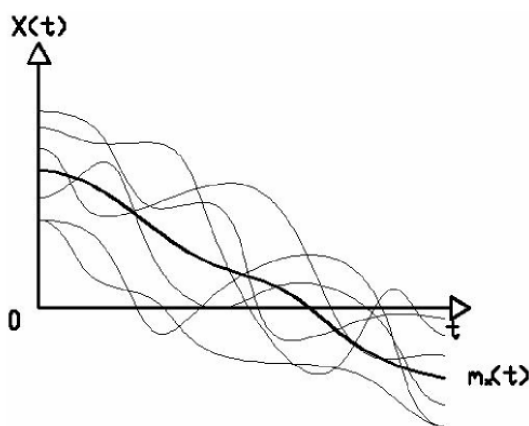


Figura 3.3 - Realizzazioni di una FA (tratto sottile) e sua speranza matematica (in grassetto)

La varianza della FA $X(t)$ è una funzione non aleatoria $D_x(t)$ il cui valore, per ogni t , è uguale alla varianza della sezione corrispondente della FA:

$$D_x(t) = D[X(t)] = \frac{\sum_{i=1}^N [X_i(t) - m_x(t)]^2}{N}$$

Questa funzione caratterizza, per ogni t , la dispersione attorno alla media delle possibili realizzazioni della FA $X(t)$.

D_x è una funzione non negativa; estraendone la radice quadrata si ottiene lo *scarto quadratico medio* della FA:

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}$$

La speranza matematica (E) e la varianza sono caratteristiche insufficienti a descrivere le proprietà essenziali della FA. Se consideriamo le due FA $X_1(t)$ e $X_2(t)$ di figura 3.4, queste hanno speranza matematica e varianze quasi identiche ma il loro andamento è del tutto diverso.

La FA $X_2(t)$ varia in maniera continua, graduale: se nel punto t il suo valore supera la media, è molto probabile che questo accada anche nel punto t' . I valori di $X_2(t)$ dipendono gli uni dagli altri per diversi t .

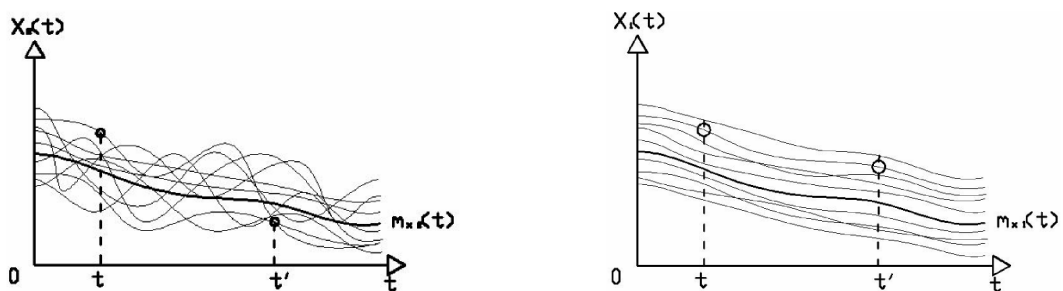


Figura 3.4 - E per la funzione $X_1(t)$ (a sinistra) e per la funzione $X_2(t)$ (destra)

La FA $X_1(t)$, al contrario, presenta un andamento nettamente oscillatorio, con oscillazioni irregolari e disordinate. Una FA con tale andamento è caratterizzata

dallo smorzamento delle relazioni tra i suoi valori, proporzionale all'aumento della distanza tra questi, lungo l'asse del tempo.

Dalla figura 3.4 si evidenzia che la struttura interna delle due FA è del tutto differente ma la speranza matematica e la varianza non sono in grado di descrivere questa differenza; a tal fine è necessario introdurre una nuova caratteristica, rappresentata dalla *funzione di autocorrelazione*.

Questa funzione caratterizza il grado di dipendenza tra le sezioni di una FA per differenti valori di t.

Si supponga di avere una FA X(t) (figura 3.5) e si considerino due sezioni a due istanti differenti t e t': in questo modo si ottengono le VA X(t) e X(t'). E' evidente che per valori vicini di t e t' le VA X(t) e X(t') risultano legate da una stretta relazione: se la VA X(t) ha assunto un certo valore, X(t') assumerà, con grande probabilità, un valore molto vicino al primo. Ci si aspetta che all'aumentare della distanza tra le sezioni t e t' la relazione tra X(t) e X(t'), in generale, sia più debole.

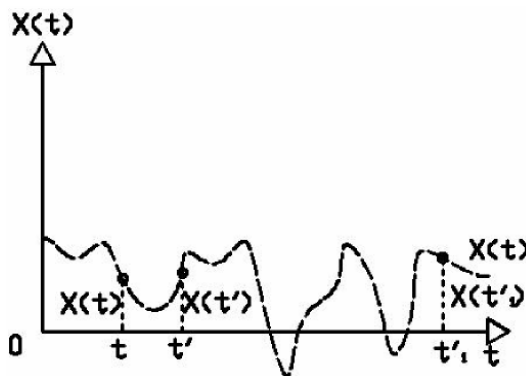


Figura 3.5 - Andamento della FA X(t)

Il grado di interdipendenza tra le VA X(t) e X(t') può essere caratterizzato dalla covarianza. La funzione di correlazione della FA $K_x(t, t')$ è una funzione non aleatoria di due argomenti (t e t') che per ogni coppia di valori t e t' è uguale alla covarianza delle sezioni corrispondenti della FA:

$$K_x(t, t') = \frac{\sum_{i=1}^N [X_i(t) - m_x(t)][X_i(t') - m_x(t')]}{N}$$

Una FA $X(t)$ è detta stazionaria se tutte le sue caratteristiche probabilistiche non dipendono da t , ossia non cambiano traslando gli argomenti sull'asse del tempo.

Poiché una FA stazionaria varia uniformemente nel tempo (nello spazio se si considera la funzione $Z(x)$ dove x indica la posizione del punto nello spazio), la sua speranza matematica sarà costante:

$$m_x(t) = m_x \qquad m_z(x) = m_z \quad \text{se consideriamo la FA } Z(x)$$

Una seconda condizione che deve soddisfare una FA stazionaria è che la sua varianza sia costante:

$$D_x(t) = D_x \qquad D_z(x) = D_z \quad \text{se consideriamo la FA } Z(x)$$

Una terza condizione da soddisfare riguarda la funzione di correlazione. Si consideri a tal fine la FA $X(t)$ in figura 3.6:

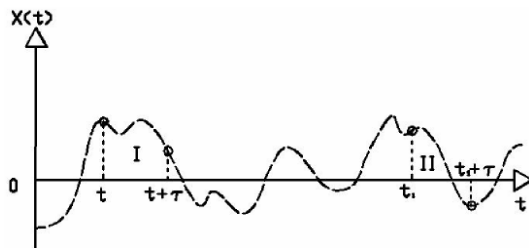


Figura 3.6 - Funzione aleatoria $X(t)$

dove $t' = t + \tau$

e

$K_x(t, t + \tau)$ = covarianza di due sezioni della FA separate dall'intervallo di tempo τ .

Se il processo aleatorio $X(t)$ è davvero stazionario, la covarianza non dipenderà da dove si sceglie sull'asse delle t l'intervallo τ , ma solo dalla lunghezza dell'intervallo stesso.

Nella figura si può osservare che negli intervalli I e II di uguale lunghezza τ , i valori $K_x(t, t + \tau)$ e $K_x(t_1, t_1 + \tau)$ della funzione di correlazione devono essere uguali.

In genere, la funzione di correlazione di un processo stocastico stazionario deve soddisfare la seguente condizione:

$$K_x(t, t + \tau) = k_x(\tau)$$

Dalla formula si evince che la funzione di correlazione di un processo stocastico stazionario è funzione di un solo argomento.

L'equazione secondo cui la varianza di una FA stazionaria deve essere costante, risulta essere un caso particolare della $K_x(t, t + \tau) = k_x(\tau)$. Infatti, ponendo nell'equazione precedente $t + \tau = t$ (con $\tau = 0$) si ha:

$$D_x(t) = K_x(t, t) = k_x(0)$$

Da ciò risulta evidente che l'equazione $K_x(t, t + \tau) = k_x(\tau)$ è l'unica condizione essenziale che deve essere soddisfatta affinché una FA sia stazionaria. Pertanto una FA stazionaria è una FA la cui funzione di correlazione non dipende da due argomenti t e t' ma solo dalla loro differenza τ .

Se si considera la FA $Z(x)$, la funzione di correlazione dipenderà dalla distanza tra i due punti x_0 e $x_0 + h$.

3.4 LE VARIABILI REGIONALIZZATE

La variabile regionalizzata (VR) è una variabile distribuita nello spazio. Dal punto di vista matematico una VR è una semplice funzione $f(x)$ che presenta un valore in ogni punto x di coordinate (x_u, x_v, x_z) in uno spazio a tre dimensioni.

Le VR presentano due aspetti caratteristici:

- un aspetto casuale, che tiene conto delle irregolarità locali del fenomeno naturale: per esempio in una zona all'interno di un'area inquinata, i valori dell'agente inquinante sembrano variare casualmente;
- un aspetto strutturato che riflette le tendenze a grande scala del fenomeno: all'interno di un'area inquinata ci sono zone che mostrano valori dell'agente inquinante più elevati che in altre.

I comuni modelli statistici che includono i “*trend surfaces*” (analisi direzionale della superficie che interpola i nostri dati, basata sulla rappresentazione della superficie mediante una funzione deterministica più una componente casuale)

comprendono tutta la casualità nel termine “errore”, mentre l’aspetto strutturato viene assegnato al termine “deterministico”.

Il modello fondamentale per una VR $Z(x)$, osservata nel punto x , può essere descritto da:

$$z(x) = m(x) + K(x)$$

dove $K(x)$ è la componente casuale e $m(x)$ la componente strutturata detta *trend*.

Esistono casi in cui il trend è assente oppure costante nel dominio in esame ma, anche nel caso in cui esso sia presente, è opportuno analizzare l’informazione contenuta nella componente residua $K(x)$, infatti le fluttuazioni descritte da questa componente spesso non sono errori ma caratteristiche tipiche dei dati osservati.

Il modo migliore per rappresentare la realtà è quello di considerare l’aspetto casuale in termini di fluttuazioni attorno ad una superficie fissa (*drift*). Il primo obiettivo di uno studio geostatistico è quello di identificare la struttura di queste fluttuazioni che rappresentano le caratteristiche del fenomeno.

È necessaria un’interpretazione probabilistica del fenomeno tramite il concetto di funzione aleatoria.

Il valore osservato in ogni punto x è considerato come il risultato $z(x)$ di una variabile casuale $Z(x)$ il cui valore medio al punto x è chiamato *tendenza* ($m(x)$, *drift*). In tal modo è possibile stimare il valore di x anche in punti dove non sono state fatte misurazioni. In termini matematici la famiglia di tutte queste variabili casuali è detta FA; la dipendenza reciproca di queste variabili è specificata da un meccanismo probabilistico.

La FA esprime gli aspetti casuale e strutturato di un fenomeno naturale: localmente il valore nel punto $z(x)$ viene considerato come una VA ma questo valore puntuale $z(x)$ è anche una FA, in quanto per ogni coppia di punti x_i e $x_i + h$ le relative variabili casuali $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ sono legate da una correlazione espressa dalla struttura spaziale della VR. In questo caso la VR che rappresenta il fenomeno (cioè la serie di tutti i suoi possibili valori distribuiti nello spazio) viene considerata come una particolare realizzazione della FA costruita su questo

fenomeno (cioè una serie infinita di VA che rappresentano i valori del fenomeno in ogni punto dello spazio).

L'interpretazione probabilistica di una VR $z(x)$ come una particolare realizzazione di una certa FA $Z(x)$ ha senso operativo solo nel caso in cui sia possibile dedurre la legge di probabilità che definisce la FA nella sua interezza. Questo non è possibile a partire da una sola realizzazione $z(x)$ che per giunta è limitata ad un numero finito di punti di campionamento x_i (es. è impossibile determinare la legge della VR "risultato del lancio del dado" a partire da un singolo risultato numerico originato da un unico lancio del dado). Sono necessarie molte realizzazioni $z_1(x)$, $z_2(x)$, ..., $z_k(x)$ della FA $Z(x)$ per dedurre la legge di probabilità di $Z(x)$.

Poiché in pratica ci si limita spesso ad una singola realizzazione della $z(x_i)$ della FA nel punto x_i , è necessario introdurre delle ipotesi, che coinvolgono diversi gradi di omogeneità spaziali e vengono racchiuse sotto il concetto di *ipotesi di stazionarietà*:

“Se all'interno di una certa area il fenomeno studiato può considerarsi omogeneo, si può affermare che la VR si ripete nello spazio. Questa omogeneità, o ripetizione nello spazio, della VR fornisce l'equivalente di molte realizzazioni della stessa FA $Z(x)$ e permette l'inferenza statistica”

Due valori sperimentali $z(x_0)$ e $z(x_0 + h)$ in due punti differenti x_0 e x_0+h possono essere considerati come due realizzazioni differenti della stessa VR $Z(x_0)$.

Una variabile si dice stazionaria quando la sua distribuzione non varia con la traslazione. Allo stesso modo una VA stazionaria si ripete nello spazio. In questo modo è possibile applicare l'inferenza statistica.

Il fenomeno della stazionarietà può essere definito attraverso i momenti del primo e del secondo ordine di una FA, e i gradi di stazionarietà corrispondono a quei particolari momenti che rimangono invariati all'interno dell'area in esame.

Per una VR $z(x)$ osservata nel punto x_i , la funzione di distribuzione $z(x)$ ha un'attesa pari a:

$$E\{Z(x)\} = m(x) \quad (\text{momento di primo ordine})$$

I *momenti di secondo ordine* considerati in geostatistica sono tre:

1. la *varianza* della VA $z(x)$:

$$\text{Var}\{Z(x)\} = E\left\{\left[Z(x) - m(x)\right]^2\right\}$$

2. la *covarianza*, se le due VA $Z(x_1)$ e $Z(x_2)$ hanno una varianza nei punti x_1 e x_2 , dunque hanno una covarianza, che è funzione dei due punti, definibile come:

$$C(x_1, x_2) = E\left\{\left[Z(x_1) - m(x_1)\right]\left[Z(x_2) - m(x_2)\right]\right\}$$

3. il *semivariogramma* definito come la semivarianza dell'incremento $[Z(x_1) - Z(x_2)]$:

$$\gamma(x_1, x_2) = \text{Var}\left[Z(x_1) - Z(x_2)\right]/2$$

Le funzioni del semivariogramma e della covarianza dipendono contemporaneamente dai due punti di supporto x_1 e x_2 , in questo caso è possibile avere a disposizione molte coppie di $VR\{Z(x_1), Z(x_2)\}$ sulle quali effettuare l'inferenza statistica. Inoltre se queste funzioni dipendono solo dalla distanza che separa i due punti di supporto (vettore $h = x_1 - x_2$), ogni coppia di dati $\{z(x_k), z(x_{k'})\}$ separata dalla distanza $(x_k - x_{k'})$, uguale al vettore h , può essere considerata come una differente realizzazione della coppia di $VR\{Z(x_1), Z(x_2)\}$. È chiaro che in una zona omogenea la correlazione che esiste tra i valori di due punti $z(x_k) - z(x_{k'})$ non dipende dalla particolare posizione dei due punti ma dalla distanza che li separa.

Nel suo significato più stretto la stazionarietà di una variabile richiede che tutti i momenti non varino con la traslazione, ma poiché questo non può essere verificato a partire da un limitato set di dati sperimentali, si richiede la costanza dei soli primi due momenti: la media e la covarianza (*stazionarietà di secondo ordine*).

Una FA è detta stazionaria quando:

1. l'attesa matematica esiste e non dipende dal punto di supporto x :

$$E\{Z(x)\} = m, \forall x$$

2. per ogni coppia di VA $\{Z(x_0), Z(x_0 + h)\}$ la covarianza esiste e dipende dalla distanza di separazione h :

$$C(h) = E\{Z(x+h) \cdot Z(x)\} - m^2, \forall x$$

dove h è il vettore coordinate nelle tre dimensioni dello spazio.

La stazionarietà della covarianza implica la stazionarietà della varianza e del semivariogramma:

$$\text{Var}Z(x) = E\{Z(x) - m\}^2 = C(0), \forall x$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = C(0) - C(h), \forall x$$

Nell'ipotesi di stazionarietà di secondo ordine, la covarianza e il semivariogramma costituiscono due mezzi equivalenti per caratterizzare l'autocorrelazione spaziale tra due variabili $Z(x)$ e $Z(x+h)$ separate dalla distanza h .

Esistono molti fenomeni fisici (quindi FA) che mostrano una grande capacità di dispersione, cioè non hanno né una varianza né una covarianza, ma per essi è possibile definire il variogramma. Di conseguenza l'ipotesi di stazionarietà di secondo ordine viene ridotta alla sola esistenza e stazionarietà del variogramma e prende il nome di *ipotesi intrinseca*.

Una FA $Z(x)$ viene detta intrinseca quando:

1. l'attesa matematica E esiste e non dipende dal punto di supporto x :

$$E\{Z(x)\} = m, \forall x$$

2. per tutti i vettori h l'incremento $[Z(x+h) - Z(x)]$ possiede una varianza finita che non dipende da x :

$$\text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h)$$

L'ipotesi intrinseca può essere vista come una limitazione dell'ipotesi di stazionarietà di secondo ordine ad alcuni incrementi della FA $Z(x)$; viene definito in tal modo il concetto di "quasi-stazionarietà" in cui il variogramma è utilizzato solo per distanze limitate $|h| \leq b$.

Tale limite può essere dato sia dall'estensione di una zona omogenea all'interno di un'area che dalle dimensioni dell'intorno di ricerca utilizzato durante la stima nel kriging. In pratica, con l'ipotesi di quasi stazionarietà è possibile definire dei confini all'interno dei quali l'attesa e la covarianza possono essere considerate stazionarie e i dati sono sufficienti a rendere possibile l'inferenza statistica.

3.5 IL VARIOGRAMMA

L'analisi del variogramma (fig. 3.7) è fondamentale per uno studio geostatistico poiché esso sintetizza tutta l'informazione essenziale, quale forma della variazione, sua grandezza e scala spaziale. Il variogramma dipende sensibilmente dalla scala di indagine e dalle dimensioni dell'area di campionamento. Una volta determinato il variogramma sperimentale è necessario adattare alle semi-varianze discrete un modello matematico, che è utilizzato nella fase successiva di interpolazione con il *kriging*. I modelli teorici possono assumere forme differenti, ma in generale quelli che appaiono limitati superiormente raggiungono un valore massimo (*sill*), a distanza finita (*range*) o asintoticamente a distanza infinita: in questo caso il *sill* rappresenta la varianza *a priori* di un processo casuale. Spesso il variogramma sperimentale interseca l'asse delle ordinate ad un valore positivo, noto come *varianza di nugget*, che comprende due componenti:

l'errore di misura e la variazione ad una scala più piccola del minimo intervallo di campionamento.

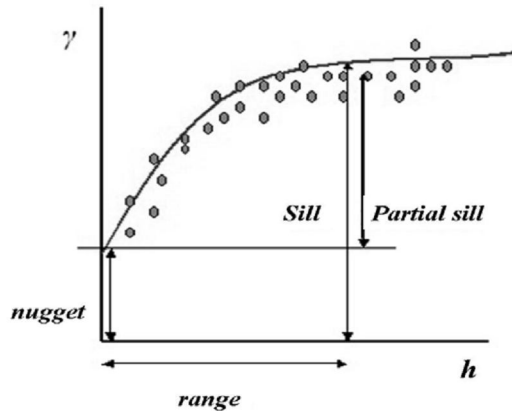


Figura 3.7 - Variogramma teorico

Come caso estremo, il variogramma sperimentale può presentare un andamento orizzontale, definito *nugget puro*, che denota totale assenza di dipendenza spaziale tra i dati, per cui non ha senso applicare un metodo di interpolazione. Se la variabile è supposta comunque continua, solo l'aumento della dimensione del campione potrebbe rivelare l'esistenza di una struttura spaziale a scala più piccola

3.6 IL KRIGING

Il kriging è una tecnica che permette di ottenere stime ottimali e non distorte della variabile regionalizzata in punti non campionati, utilizzando i risultati dell'analisi strutturale, precedentemente descritta, e la serie dei dati sperimentali. Per ogni valore stimato viene calcolato anche un termine di errore (varianza della stima), che fornisce una misura dell'affidabilità dell'interpolazione. Le forme più semplici di kriging consentono la stima di valori puntuali (kriging puntuale) o areali (kriging a blocchi) e presuppongono stazionarietà nei dati.

Il kriging consiste essenzialmente in una media mobile pesata:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (\text{eq. 3.1})$$

dove $\hat{z}(x_0)$ è la stima della variabile z in un punto x_0 , N rappresenta il numero dei punti ricadenti in un intorno di ricerca di x_0 e utilizzati per la stima e λ_i rappresenta i pesi assegnati a ciascun punto. I suddetti pesi sono calcolati in modo

da minimizzare la varianza di stima, con il vincolo che la loro somma sia uguale ad 1. Per ottenere delle mappe spaziali, $\hat{z}(x_0)$ è calcolato ai nodi di una griglia definita dall'utente: i risultati possono essere rappresentati sottoforma di mappe ad isolinee, a falsi colori o tridimensionali. Il kriging permette di superare molte delle limitazioni proprie dei metodi tradizionali di interpolazione; ad esempio, i pesi nel kriging non sono arbitrariamente fissati, ma determinati sulla base del modello di variogramma e della configurazione dei dati. Il kriging rappresenta un interpolatore non distorto e "ottimale", nel senso che le stime corrispondono alla minima varianza errore.

Queste caratteristiche sono sufficienti per affermare la superiorità del kriging rispetto ad altri interpolatori. Va comunque sottolineato che, come ogni procedura statistica, esso presuppone il verificarsi di determinati assunti fra cui, fondamentale, la presenza di una dipendenza spaziale tra i dati. L'ampia varietà di procedure di kriging richiede inoltre una scelta oculata di quella più adatta al caso considerato.

4. I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI

“Un sistema informativo geografico è un insieme organizzato di hardware, software, dati geografici e persone progettato per raccogliere, immagazzinare, manipolare, analizzare e rappresentare in modo efficiente tutte le forme di informazione geograficamente referenziata”(Zeiler).

I Sistemi Informativi Geografici (Geographic Information System, GIS), rappresentano una grande innovazione nella gestione e nella produzione cartografica. Tali sistemi sono basati sulla fusione dei sistemi di disegno computerizzato (CAD) con i data base relazionali (DBMS); il primo sistema ha permesso il disegno computerizzato delle entità geografiche, il secondo l'immagazzinamento dei dati e delle informazioni legate a queste entità. I GIS permettono di analizzare un'entità geografica, sia per la sua completa natura geometrica (e simbolica), sia per il suo contenuto informativo; in pratica questi sistemi realizzano, attraverso l'ingegneria del software, un legame tra ogni entità geografica di una carta e un record di un database.

Esistono diversi acronimi che fanno riferimento, con qualche lieve differenza, alla concezione di Sistemi Informativi Geografici. Tra questi i più utilizzati sono:

- S.I.T.: Sistema Informativo Territoriale;
- G.I.S.: Sistema Informativo Geografico (Geographical Information System).

Sebbene sia uso comune utilizzare indistintamente, in alternativa tra loro, i termini GIS e SIT, molti autori sono concordi nel ritenere che le due definizioni non coincidano. Il SIT può essere inteso come l'insieme dei dati geografici organizzati per un relativo territorio, mentre il GIS è lo strumento per visualizzare e modificare tali dati.

Il GIS permette di unire un database ad una cartografia digitale, consentendo di gestire al meglio, mediante un computer, una determinata porzione di territorio; questo rende possibile la creazione di carte, l'integrazione di diverse informazioni, la visualizzazione di scenari, la risoluzione di complessi problemi e lo sviluppo di effettive soluzioni esprimibili sia in forma cartografica che in forma quali-quantitativa.

4.1 LA STRUTTURA DEI DATI GEOGRAFICI

Vi sono due modelli principali per rappresentare i dati nel computer: il modello vettoriale ed il modello raster.

Gli elementi fondamentali di rappresentazione del modello vettoriale sono rappresentati da punti, linee e poligoni, codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate. Un oggetto puntuale (es. un pozzo) viene rappresentato da una coppia di coordinate (x, y). Elementi lineari, come strade, fiumi, confini, sono invece descritti da una sequenza di punti; infine, elementi areali come bacini idrici, parchi naturali, aree agricole, sono definiti da poligoni, ossia da una sequenza di coordinate di punti nella quale le coordinate dell'ultimo punto coincidono con quelle del punto di origine.

Nel modello raster, l'immagine viene scomposta in una griglia di celle, sulle quali è basata la rappresentazione dello spazio geografico. Le celle (pixels) hanno forma e misura regolare e sono ordinate secondo linee e colonne. Ogni cella possiede un valore alfanumerico, associato ad un attributo di tipo grafico o descrittivo, che esprime il parametro che i dati vogliono rappresentare (es. la temperatura, l'esposizione del versante ecc.).

L'insieme dei dati raster corrisponde ad una mappa avente risoluzione corrispondente all'area delle celle, che rappresenta la variazione del parametro considerato nell'area geografica descritta.

I GIS permettono la coabitazione dei formati vettoriale e raster e il passaggio dall'uno all'altro di tali modelli di dati. Si sottolinea come la presenza di informazioni topologiche che accompagnano i dati vettoriali e raster assicuri non solo la rappresentazione corretta di immagini degli oggetti georeferenziati, ma anche la ricostruzione della loro fruibilità e consistenza. La differenza fondamentale tra dati CAD e GIS consiste nel fatto che i primi si limitano a rappresentare la consistenza geometrica di un oggetto mentre i secondi ne determinano anche la struttura e le connessioni interne.

I dati vettoriali e i dati raster si adattano ad usi diversi; la cartografia vettoriale è particolarmente adatta alla rappresentazione di dati che variano in modo discreto (come ad esempio la rappresentazione delle strade o di una carta dell'uso del suolo) mentre quella raster è più adatta alla rappresentazione di dati che

presentano una variabilità continua (es. la variazione dell'umidità o della pendenza in un suolo agricolo).

4.2 FUNZIONALITÀ DI UN GIS

In un GIS i dati, siano essi punti, linee o aree, sono descritti da numeri ed archiviati come grandezze numeriche che rappresentano le coordinate (x, y) dei dati. Utilizzando le coordinate (x, y), il GIS consente di manipolare la geometria dei dati e le relazioni intercorrenti tra di essi per creare nuove informazioni. Questa capacità conferisce al GIS la potenza analitica che la carta non possiede.

Con il GIS è possibile associare ai dati geografici le informazioni descrittive ad essi correlate; tali informazioni vengono dette “attributi” e possono comprendere un’ampia gamma di dati. Gli attributi sono organizzati secondo uno schema matriciale di righe e di colonne: ogni colonna (o campo) contiene i valori dell’attributo ed ogni riga (o record) rappresenta i valori di tutti gli attributi relativi ad un singolo elemento geografico. L’insieme delle righe e delle colonne in cui gli attributi sono organizzati prende il nome di tabella.

A ciascun elemento geografico possono essere associate più tabelle, ognuna comprendente un insieme di caratteristiche di quel determinato elemento, concettualmente correlate tra loro. La creazione, organizzazione e gestione delle tabelle è compito specializzato del sottosistema del GIS di gestione dei dati.

La caratteristica basilare del funzionamento dei GIS è il legame esistente tra gli elementi geografici e i loro attributi. Tale legame è realizzato mediante un identificatore, ovvero un codice unico composto da numeri (o da numeri e lettere) che viene assegnato contemporaneamente sia all’elemento geografico e sia al record che identifica l’insieme dei suoi attributi nella tabella.

La tabella degli attributi contiene in genere un campo denominato ID in cui sono archiviati tutti gli identificatori; l’esistenza di tale legame permette di richiamare gli attributi a partire dai dati geografici e/o di accedere ai dati geografici in base agli attributi delle tabelle.

Il sistema degli identificatori consente al GIS di visualizzare le carte in modo dinamico, sulla base di qualunque attributo prescelto. Inoltre, lo stesso elemento

geografico può essere rappresentato con simboli e grafiche differenti a seconda dell'attributo selezionato.

Un elemento fondamentale del Sistema Informativo Geografico è il database, che altro non è che una raccolta di mappe ed informazioni associate in forma digitale.

Il database può essere considerato composto da due elementi:

- un database spaziale dove vengono immagazzinate le caratteristiche geografiche (forma e posizione) delle superfici della Terra;
- un database di attributo, che descrive le caratteristiche degli elementi geografici.

La consultazione del database permette di visualizzare le informazioni relative agli elementi geografici in funzione dell'ubicazione (cosa c'è nel punto di coordinate x e y) e di un particolare attributo (dove sono ubicati i pozzi in una determinata area).

Le posizioni dei dati sulla carta sono riferite alle posizioni reali degli elementi del mondo reale che essi rappresentano. La posizione di qualunque elemento sulla superficie terrestre viene misurata in gradi di latitudine e longitudine (coordinate geografiche) mentre sulla carta le posizioni sono riferite ad un sistema bidimensionale di coordinate planari, che identificano la posizione di un elemento come distanza da un'origine (0,0) misurata lungo due assi (x , y). Per trasferire gli elementi dalla superficie sferica della Terra a quella piatta della carta si utilizzano le proiezioni cartografiche, un insieme di formule matematiche che trasformano latitudine e longitudine in coordinate (x,y). Il GIS permette di operare tale trasformazione e in questo modo è possibile sovrapporre dei dati aventi proiezioni e riferimenti differenti ma relativi ad una stessa porzione di territorio.

Una delle funzioni più interessanti dei GIS è rappresentata dalla possibilità di condurre un'analisi spaziale dei dati, che consiste nella trasformazione ed elaborazione degli attributi degli elementi geografici. Ciò consente di mettere in relazione tra di loro dati diversi, sulla base del loro comune riferimento geografico, in modo da creare nuove informazioni a partire dai dati esistenti.

Ad esempio, se in un comprensorio si vuole conoscere la superficie investita a vigneto su un suolo avente tessitura franco-argillosa, il GIS consente di creare

dapprima uno strato dei vigneti, mediante riclassificazione di ogni codice di uso del suolo in due valori (figura 4.1):

- 1 per aree investite a vigneto;
- 0 per tutti gli altri casi.

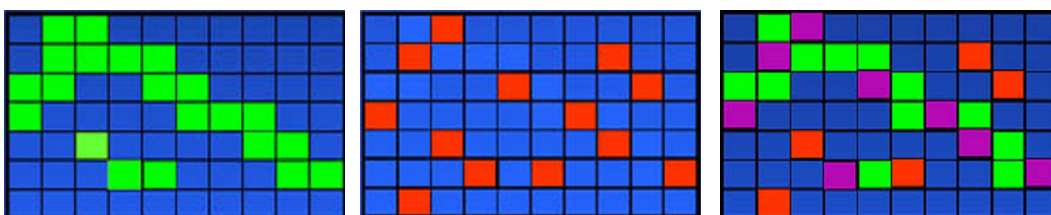


Figura 4.1 - Overlay tra due strati logici

Lo strato risultante è noto come un strato Booleano o logico, dal momento che mostra delle relazioni di vero/falso; questo strato infatti, mostra solamente quelle aree che soddisfano la condizione (1 vero = verde) e quelle che non lo fanno (0 falso = blu). Una volta creato lo strato dei vigneti, si esegue lo stesso procedimento con lo strato informativo riguardante il suolo, ottenendo lo strato informativo che mostra le aree con tessitura franco-argillosa (rosso).

A questo punto, dalla combinazione delle due condizioni tramite un'operazione denominata *overlay*, si mettono in evidenza (in viola) le aree geografiche che soddisfano entrambe le condizioni.

Tipicamente, l'operazione di overlay in un GIS, permette la produzione di nuovi strati informativi mediante combinazioni logiche o matematiche di due o più strati di contributo.

Tra le potenzialità dei Sistemi Informativi Geografici vi è anche quella della modellazione tridimensionale. Un modello di un oggetto tridimensionale GIS è un sistema a tre coordinate reali che può essere generato in diversi modi; se gli elementi quotati dell'oggetto si presentano in ordine sparso, viene utilizzato un algoritmo di modellazione in grado di descrivere l'oggetto tramite una rete irregolare di triangoli quotati: il TIN (Triangulated Irregular Network).

Se è disponibile, invece, una rete regolare di punti quotati che descrive l'oggetto, è possibile creare un modello tridimensionale (DTM, Digital Terrain Model o DEM

Digital Elevation Model) che permette al sistema di ricavare mappe di livello, analisi di visibilità, analisi della pendenza, viste 3D e molto altro.

In particolare dalla costruzione di un modello TIN, DTM o DEM, è possibile ricavare la distanza reale tra due punti, individuare il percorso minimo e generare interpolazioni di quota. L'insieme di queste operazioni si indicano come: "funzione di modellazione tridimensionale GIS" e corrispondono ad operatori specifici appartenenti agli ambienti di sviluppo GIS più evoluti.

4.3 PROGETTAZIONE DI UN GIS

Il progetto di un GIS è articolato secondo un modello logico in più livelli che comprendono:

- La definizione degli obiettivi;
- La creazione del database;
- L'analisi dei dati;
- La presentazione dei risultati.

4.3.1 La definizione degli obiettivi

L'individuazione degli obiettivi guida l'impostazione del sistema. In Fase di avvio del lavoro è necessario porsi alcune domande:

- Qual è il problema da risolvere?
- Quali sono le soluzioni finora adottate?
- Il problema può essere risolto in modo alternativo e più efficace utilizzando le metodologie GIS?
- Quali sono i prodotti finali che devono scaturire dal progetto?
- Chi sono i destinatari di questi prodotti?
- I dati utilizzati possono essere impiegati anche in altri settori? Se è così, quali devono essere le specifiche esigenze?

4.3.2 La creazione del database

Alla definizione delle esigenze segue la strutturazione del database, punto fondamentale nella creazione del GIS; infatti, dal contenuto e dall'organizzazione

concettuale della banca dati dipende la qualità dell'analisi e dei risultati. In questa fase è necessario:

- individuare i dati spaziali utili per risolvere un problema;
- eseguire rigorosi controlli di qualità sui dati;
- definire le modalità di immissione dei dati nel GIS;
- individuare gli attributi alfanumerici da associare ai dati spaziali e organizzare le tabelle;
- impostare i dati su differenti livelli tematici.

4.4.3 L'analisi dei dati

Il GIS dimostra la massima potenzialità nel campo delle analisi spaziali; le operazioni di interrogazione e di analisi possono essere eseguite sui dati geografici, sugli attributi o in modo integrato sugli uni e sugli altri, su un singolo livello tematico o sulla combinazione di più livelli, in modo da ottenere strati informativi diversi da quelli originari.

Il GIS può creare modelli ed esplorare tutti gli scenari possibili che derivano dalle scelte di gestione e di pianificazione territoriale, rispondendo a quesiti come:

- Quali sono gli spazi più idonei per l'edificazione di una nuova area residenziale?
- Quale è il percorso minimo per raggiungere un'area boschiva in caso di incendi?
- Quale è l'area di rispetto che bisogna prevedere intorno al corso di un fiume per la costruzione di edifici?

4.3.4 La presentazione dei risultati

Il GIS offre numerose opzioni per la presentazione dei risultati dell'analisi; i dati possono essere visualizzati mediante la creazione di carte, efficaci per comunicare informazioni geografiche attraverso simbologie e colori selezionabili a secondo delle esigenze di rappresentazione.

Le mappe possono essere corredate da tabelle, grafici, rappresentazioni tridimensionali e multimediali, animazioni, simulazioni e file.

In conclusione, il GIS rappresenta un valido supporto per gestire la complessità dei dati territoriali. Permette di avere una visione complessiva delle diverse componenti del territorio e di simularne le evoluzioni e le trasformazioni.

5. OBIETTIVI DELLA RICERCA

Il contenuto di carbonio organico (SOC) è una caratteristica molto importante per la qualità del suolo (Karlen et al., 1997; Murage et al., 2000). La quantità di carbonio presente nei suoli è strettamente legata al ciclo globale del carbonio. La misura della quantità e della distribuzione spaziale del carbonio organico nei suoli è essenziale per la comprensione dei processi che governano il sequestro del carbonio nel suolo (Venteris et al., 2004).

Esistono attualmente pochi studi specifici che considerano le relazioni esistenti tra la variazione spaziale del carbonio organico del suolo ed i fattori ambientali (Venteris et al., 2004). La maggior parte di questi lavori spaziali sono principalmente orientati alla stima e alla mappatura dei pool di carbonio (Knowles and Singh, 2003; Schuur, et al., 2001; Wang and Zhou, 1999) e i valori di carbonio sono stati spesso stimati a partire da precedenti osservazioni o da un numero limitato di nuovi campioni. Questi dati non sono ideali per studi specifici sulla variabilità spaziale del SOC in relazione alla topografia e all'uso del suolo, specialmente in indagini ad alta risoluzione come ad esempio quelle condotte a scala parcellare o di bacino.

La litologia ed il clima esercitano una notevole influenza sulle proprietà del suolo ad ampia scala spazio-temporale, mentre l'orografia e l'uso del suolo condizionano le caratteristiche del suolo a piccola scala di analisi ed in aree declivi (Wang et al., 2001). Alcuni studi dimostrano che il contenuto di carbonio organico nei suoli varia con la posizione lungo il pendio (Miller et al., 1988). Infatti, in uno studio sui suoli collinari Pierson et al. (1990) hanno osservato un contenuto di SOC più elevato sia alla sommità che alla base del pendio rispetto al contenuto di SOC osservato alle quote intermedie. Inoltre, Gregorich ed Anderson (1985) hanno dimostrato che il contenuto di C organico in suoli investiti a pascolo, aumenta passando dalle posizioni lungo il versante a quelle ai piedi del pendio.

Esistono diversi studi riguardanti l'effetto dell'uso del suolo sul contenuto di carbonio organico (Ross et al., 1999; Wang et al., 2004; Puget et al., 2005), ma tali studi raramente considerano l'effetto derivante dall'orografia dei siti di campionamento sulla distribuzione del SOC. Di conseguenza, l'importanza delle

relazioni che intercorrono tra i fattori topografici e l'uso del suolo non è ancora molto chiara.

Le scorte di carbonio organico nel suolo sono determinate da due variabili: la concentrazione di carbonio organico e la densità apparente; tali variabili col tempo possono subire delle variazioni. La quantificazione della capacità di sequestro di C dei suoli richiede la valutazione di entrambe le variabili nello stesso momento.

La concentrazione di carbonio organico è strettamente associata a processi biotici quali la produzione di biomassa e la decomposizione e la disposizione della lettiera e delle radici nel suolo. La densità apparente invece, è influenzata dalla litologia, dalla genesi del suolo e dalla formazione di aggregati e può subire variazioni in seguito a cambi nell'uso del suolo, erosione e disturbi antropici dovuti a lavorazioni e compattazione (Lal e Kimble, 2001).

E difficile valutare le variazioni negli stock di carbonio organico nel breve periodo su scala nazionale e globale (Smith, 2004). La conoscenza della variabilità della concentrazione del carbonio organico e della densità apparente nella maggior parte dei tipi di suolo, su scala parcellare, può essere di aiuto nella definizione di efficaci disegni di campionamento.

Questo lavoro è stato condotto nell'ambito delle attività del progetto "Cambiamenti Climatici e Sistemi Produttivi Agricoli e Forestali: Impatto sulle Riserve di Carbonio e sulla Diversità Microbica del Suolo" (SOILSINK) finanziato nel 2006 dal Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca (FISR).

L'obiettivo principale del progetto SOILSINK riguarda la quantificazione dello stock di carbonio in differenti usi del suolo e l'analisi della dinamica della sostanza organica anche in considerazione di scenari climatici futuri.

L'attività di ricerca del dottorato è stata condotta in un'area ubicata nella Sardegna nord-orientale e ricadente in un piccolo bacino idrografico nei comuni di Berchidda e Monti (OT), che per brevità verrà da ora denominato area "Berchidda-Monti".

L'obiettivo principale dello studio condotto nell'ambito del dottorato è stato quello di condurre un'analisi spaziale della variabilità del contenuto di carbonio organico e della densità apparente del suolo in relazione all'orografia e a differenti

usi del suolo legati a sistemi foraggeri mediterranei (pascolo ed erbaio autunno-vernino), al fine di verificare la rappresentatività spaziale della caratterizzazione pedologica condotta mediante profili.

Si è scelto di focalizzare lo studio a partire dalle superfici destinate ad erbaio e al pascolo in quanto, nell'ambito della serie di vegetazione individuata all'interno del bacino in studio, questi due usi del suolo hanno una più marcata caratterizzazione produttiva erbacea e si collocano in posizione intermedia rispetto alla serie di vegetazione considerata.

Inoltre, nell'ottica della futura estensione dei risultati a scala di bacino, gli usi del suolo oggetto di studio sono i più rappresentativi del bacino Berchidda-Monti, in quanto le superfici destinate a pascolo ed erbaio rappresentano circa il 50% della superficie totale.

Per effettuare uno studio quantitativo della variazione spaziale del contenuto di carbonio organico del suolo in relazione alla topografia e all'uso del suolo, sono state usate metodologie di analisi statistica classica integrata con metodologie geostatistiche, in combinazione con un sistema informativo geografico (GIS).

Ulteriore obiettivo è stato quello di condurre un'analisi della variabilità verticale del contenuto di carbonio organico e della densità apparente del terreno, in relazione ai differenti usi del suolo ed in particolare della frequenza di lavorazione ed alle condizioni sottochioma (non lavorato) e fuori chioma (lavorato) in sistemi foraggeri caratterizzati dalla presenza di componenti arboree.

Altro obiettivo del lavoro ha riguardato la creazione di un Sistema Informativo Territoriale relativo all'area in esame, sia nell'ottica della caratterizzazione del bacino che per la futura applicazione dei risultati su scala territoriale.

6. IL CASO DI STUDIO: AREA “BERCHIDDA-MONTI”

L'area “Berchidda – Monti”, caratterizzata da una agricoltura di tipo estensivo, rappresenta una realtà territoriale tipica della Sardegna nord-orientale e di altre aree regionali ad agricoltura di tipo estensivo e marcatamente agro-silvo-pastorale. Tale area, situata nei territori dei comuni di Berchidda e Monti (OT) ad una quota compresa tra i 300 ed i 400 metri s.l.m, circostrive il bacino idrografico le cui acque affluiscono nell'invaso del Coghinas e si presenta relativamente omogenea dal punto di vista geologico e morfologico. Gli usi del suolo prevalenti sono rappresentati dal pascolo arborato, dalle foraggere avvicendate, dal bosco di sughera e dai vigneti.

La delimitazione dell'area di studio è stata effettuata secondo il metodo della classificazione gerarchica del paesaggio; tale metodo è di tipo deduttivo, si sviluppa cioè attraverso un percorso discendente: regioni di paesaggio, definite in base al macrobioclima (Rivas-Martínez & Rivas y Sáenz, 2007), sistemi di paesaggio definiti in base alla geolitologia (Barca *et al.*, 1996), sottosistemi di paesaggio definiti in base alla morfologia e, infine, unità di paesaggio definite in base alle classi fitoclimatiche (Blasi *et al.*, 2000).

In base a questa classificazione l'area “Berchidda – Monti” ricade nella regione mediterranea, sistema del basamento ercinico, sottosistema di fondovalle, unità mesomediterranea inferiore.

Una volta definita l'unità ambientale oggetto di indagine, attraverso un percorso inverso di tipo induttivo, quindi ascendente, si è proceduto alla sua caratterizzazione floristica e vegetazionale. Sono state identificate in una prima fase le specie e le comunità vegetali presenti all'interno dell'unità ambientale e successivamente sono stati studiati i rapporti esistenti tra comunità vegetali, distinguendo quelli dinamici da quelli catenali. Questo processo ha consentito di riconoscere una serie edafo-mesofila, che rappresenta la serie prevalente all'interno dell'unità di paesaggio, e le serie con le quali essa si pone in contatto catenale.

All'interno dell'unità ambientale, è stata definita una sottoarea avente un'estensione pari a 1454 ha entro la quale è stata avviata la realizzazione del Sistema Informativo Territoriale.

La scelta dei siti su cui effettuare i rilievi di campagna è stata guidata dall'analisi fitoclimatica, vegetazionale e pedologica. Non potendo disporre di sperimentazioni di campo di lunga durata attraverso le quali effettuare un confronto tra diverse tipologie di uso del suolo e/o sistemi colturali, sono state identificate delle parcelle caratterizzate dal medesimo potenziale ecologico, come indicato dall'analisi delle serie di vegetazione e dalle analisi pedologiche, ma utilizzate da almeno dieci anni con il medesimo sistema colturale; quest'ultimo requisito risulta indispensabile per l'analisi della dinamica dei principali processi di ricambio del carbonio nel suolo in condizioni di equilibrio.

Tabella 6.1 - Caratteristiche principali del bacino Berchidda-Monti

<i>Descrittore</i>	<i>Berchidda-Monti</i>
Ubicazione	40,82 N 9,29 E
Substrato	Granodioriti e granitoidi foliati
pH	acido
Quota	300-400 m s.l.m.
Piovosità	650-850
Temperatura media annuale	14,5
Tipologie di uso del suolo prevalenti	Sughereta, pascoli arborati, foraggere avvicendate, vigneti

6.1 INQUADRAMENTO CLIMATICO

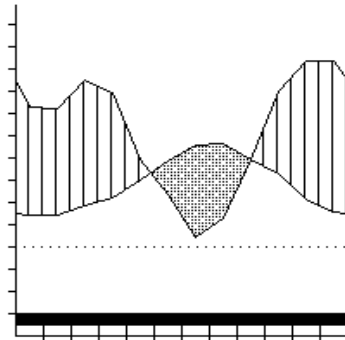
Per l'inquadramento climatico dell'area di studio "Berchidda – Monti" è stata individuata una stazione meteorologica ubicata nel territorio comunale di Monti (OT). In relazione all'esigenza di disporre di un database storico dei dati acquisiti da tale stazione, sono stati reperiti i dati meteo storici (1976-1999) attraverso la collaborazione con il S.A.R. (Servizio Agrometeorologico Regionale) e l'Assessorato ai Lavori Pubblici (Servizio Idrografico) della Regione Sardegna.

I dati acquisiti sono stati organizzati in un data base e successivamente sottoposti a verifica, al fine di individuare eventuali dati mancanti o falsati da possibili errori di trascrizione.

L'analisi bioclimatica è stata effettuata sulla base dei dati meteorologici rilevati nella stazione di Monti negli anni 1976-1999 (Fig. 6.1).

In accordo con gli indici bioclimatici di Rivas-Martínez & Rivas y Sáenz (2007) questa stazione ricade nel bioclina mediterraneo pluvistagionale oceanico, mesomediterraneo inferiore, subumido inferiore.

Monti (Italy)			296 m
P= 632	40° 48'N	9° 19'E	24/ 24 a
T= 14.2°	Ic= 16.1	Tp= 1704	Tn= 0
m= 3.2	M= 11.0	Itc= 284	Io= 3.7



**MEDITERRANEAN PLUVISEASONAL-OCEANIC
LOW MESOMEDITERRANEAN LOW SUBHUMID**

P precipitazione annuale

T temperatura media annuale

Ic indice di continentalità = t_m (mese +caldo) - t_m (mese + freddo) dove t_m è la temperatura media mensile

Tp temperatura positiva annuale = t_i con $t_i > 0$

Tn temperatura negativa annuale = t_i con $t_i < 0$

m media delle temperature minime

M media delle temperature massime

Itc indice di termicità compensato = $It = 10(T + M + m) - c$ dove M è la temperatura massima del mese più caldo m la temperatura minima del mese più freddo e c valutato in base all'indice di continentalità

Io indice ombrotermico annuale = $(Pp/Tp) * 10$ dove Pp = precipitazione dei mesi con temperatura media > 0

Figura 6.1 - Diagramma termopluviometrico e indici bioclimatici relativi alla stazione di Monti

6.2 USO DEL SUOLO

L'area Berchidda-Monti ha un'estensione pari a circa 1454 ha così ripartiti per tipologia di uso del suolo:

Tabella 6.2 - Ripartizione della superficie del bacino Berchidda-Monti nelle diverse classi di uso del suolo

TIPOLOGIA DI USO DEL SUOLO	SUPERFICIE (ha)
pascolo	689,64
pascolo arborato	230,58
vigneto lavorato	94,96
sughereta aperta	65,47
bosco di conifere	57,79
bosco di latifoglie	54,99
erbaio	41,4
macchia mediterranea	40,44
vigneto inerbito	36,65
ex coltivo	24,01
gariga	16,07
sughereta chiusa	7,25
aree a ricolonizzazione artificiale	6,97
aree con vegetazione rada	5,06
oliveto	3,83
cisteto	3,31
aree con vegetazione rada	1,97
zone umide	1,55
aree urbanizzate	72,43
SUPERFICIE TOTALE	1454,37

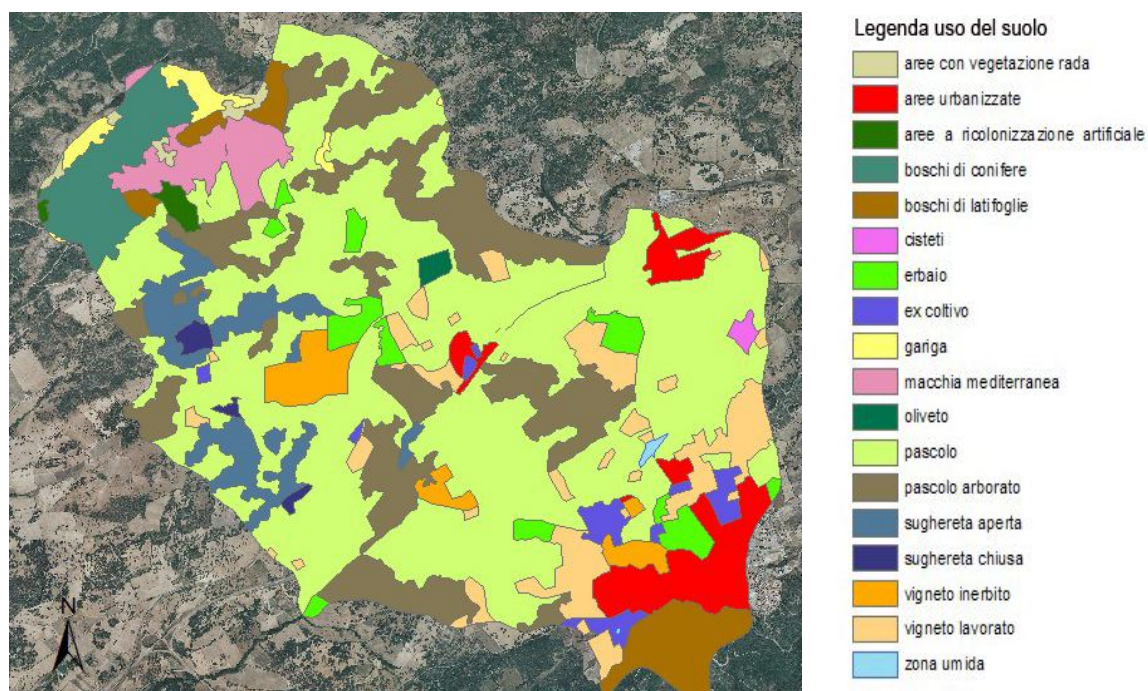


Figura 6.2 - Area "Berchidda-Monti": carta dell'uso del suolo

7. MATERIALI E METODI

7.1 LA CREAZIONE DEL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE

A partire dal gennaio 2006 è stata avviata la raccolta dei dati e in particolare, sono state avviate le attività finalizzate alla determinazione dell'incidenza delle diverse tipologie di uso del territorio sull'area in studio.

È stata reperita la cartografia digitale attuale nonché le ortofoto relative agli anni 1955 e 1977, utili sia per l'individuazione delle serie di vegetazione che per la ricostruzione dell'uso del territorio, indispensabile per l'interpretazione dei processi evolutivi attualmente in atto.

Dall'analisi delle ortofoto in bianco-nero fornite dalla Regione Autonoma della Sardegna (RAS) dell'anno 1996-97 è stato individuato il bacino di studio; le ortofoto sono state poi acquisite tramite scanner, georeferenziate e digitalizzate, ed è stata avviata la costruzione del database del bacino.

Con l'obiettivo di studiare la morfologia del territorio e verificare l'esistenza o meno di relazioni tra variabili ambientali continue (quali pendenza ed esposizione) e variabili misurate a scala puntuale (contenuto di carbonio organico e densità apparente del terreno) si è proceduto alla realizzazione di un modello digitale del terreno (DEM) con celle quadrate di 1m² di superficie, a partire dai dati di elevazione e di idrografia derivati dalle Carte Tecniche Regionali (CTR) in scala 1:10.000 della RAS.

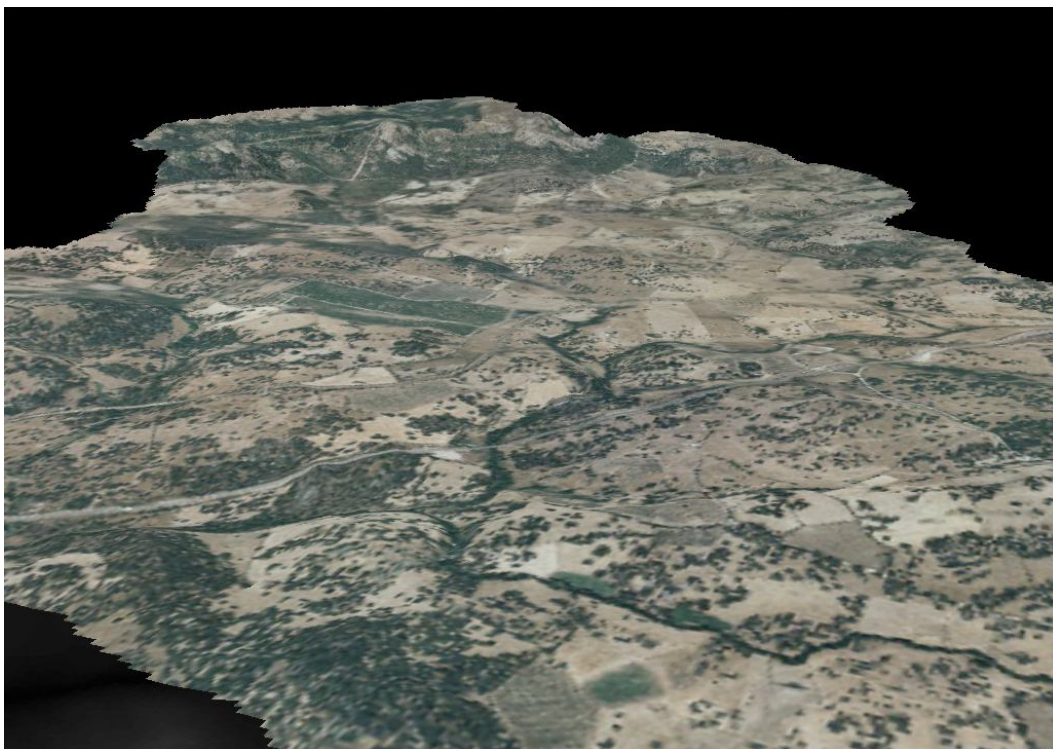


Figura 7.1 - Particolare del modello digitale del terreno dell'area "Berchidda-Monti"

A partire dal DEM sono stati calcolati i parametri topografici di pendenza ed esposizione del pendio che possono avere una notevole influenza sul contenuto di sostanza organica del terreno (Don et al., 2007).

La carta delle pendenze è stata riclassificata attenendosi alle classi di pendenza indicate dalla FAO nelle linee guida per la descrizione dei suoli (1990):

Tabella 7.1 - Classi di pendenza indicate dalla FAO

CLASSE	MORFOLOGIA	PENDENZA (%)
1	pianeggiante	< 2
2	debolmente ondulata	2 – 6
3	ondulata	6 – 13
4	debolmente collinare	13 – 30
5	collinare	30 – 50
6	accidentata	> 50

La carta delle esposizioni dei versanti è stata invece classificata in 9 classi:

Tabella 7.2 - Classi di esposizione derivanti dal DEM

CLASSE	ESPOSIZIONE
1	flat
2	S
3	SE
4	SW
5	E
6	N
7	NE
8	NW
9	W

La mappatura dell'uso del suolo dell'area in studio è stata fatta mediante fotointerpretazione a partire dalle ortofoto della RAS in scala 1:10.000 riferite all'anno 2000. La fotointerpretazione è stata integrata con una serie di sopralluoghi di verifica in campo e per la distinzione dei vigneti sottoposti a lavorazione da quelli inerbiti.

Per gli usi del suolo pascolo ed erbaio, nelle parcelle individuate come area di studio, è stato effettuato, con l'ausilio del GIS, l'*overlay* degli strati informativi relativi alle ortofoto dell'anno 2000, alla pendenza ed alla esposizione al fine di creare degli strati informativi omogenei per pendenza, esposizione del pendio e tipo di copertura vegetale (erbacea ed erbacea più arborea); è stato così possibile riconoscere e digitalizzare classi di aree omogenee tra loro differenziate (tabelle 7.3 e 7.4).

Tabella 7.3 - Categorie di aree omogenee individuate nell'erbaio

CLASSE	ESPOSIZIONE	PENDENZA	COPERTURA
1	N	2-6 %	fuorichioma
2	SW	2-6%	fuorichioma
3	NE	6-13%	sottochioma
4	NW	13-30%	fuorichioma
5	SW	6-13%	fuorichioma
6	NW	6-13%	fuorichioma
7	W	6-13%	fuorichioma
8	N	13-30%	fuorichioma
9	E	13-30%	fuorichoma
10	N	13-30%	sottochioma
11	E	2-6%	fuorichioma
12	N	6-13%	fuorichioma
13	E	6-13%	fuorichioma

CLASSE	ESPOSIZIONE	PENDENZA	COPERTURA
14	N	6-13%	sottochioma
15	E	6-13%	sottochioma
16	SE	13-30%	fuorichioma
17	NE	13-30%	fuorichioma
18	SE	2-6%	fuorichioma
19	NE	13-30%	sottochioma
20	SE	6-13%	fuorichioma
21	NE	2-6%	fuorichioma
22	SW	0-2%	fuorichioma
23	NE	6-13%	fuorichioma

Tabella 7.4 - Categorie di aree omogenee individuate nel pascolo

CLASSE	ESPOSIZIONE	PENDENZA	COPERTURA
1	SW	6-13%	fuorichioma
2	SW	6-13%	sottochioma
3	SW	2-6%	fuorichioma
4	SW	2-6%	sottochioma
5	SW	13-30%	sottochioma
6	SW	13-30	sottochioma
7	S	2-6%	fuorichioma
8	S	2-6%	sottochioma
9	S	6-13%	fuorichioma
10	S	6-13%	sottochioma

Ai nuovi strati informativi così creati è stata sovrapposta la griglia di campionamento con maglia quadrata 15 x 15m, avendo cura di garantire un numero minimo di tre punti di campionamento per ogni tipologia di area omogenea.

Sono stati così individuate 125 aree di saggio, 40 nel pascolo e 85 nell'erbaio, ognuna delle quali identificata mediante coordinate che sono state inserite nel GPS (Global Positioning System).

In seguito all'elaborazione dei dati derivanti dalle analisi chimiche è stato creato uno strato informativo relativo al contenuto di carbonio di ogni area di saggio, per ciascuna delle quattro profondità campionate.

7.2 CARATTERIZZAZIONE PEDOLOGICA DELL'AREA DI STUDIO

La caratterizzazione pedologica dell'area di studio è stata condotta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione di Geopedologia e Geologia Applicata.

Nell'area di studio sono stati descritti e campionati 25 profili e per ciascun orizzonte è stata determinata la densità apparente.

I profili sono stati aperti in funzione di:

- uso del suolo (attuale e/o pregresso);
- variazioni di morfologia all'interno delle aree di saggio;
- tipo di copertura vegetale;
- sottochioma o fuorichioma per pascolo, sughereta ed erbaio.

Le condizioni di uso del suolo considerate sono:

- a- vigneto non inerbito, 4 profili: (dal numero 1 al numero 4);
- b- vigneto inerbito, 3 profili: (dal numero 5 al numero 7);
- c- erbai e pascoli su erbai, 9 profili: (dal numero 8 al numero 16);
- d- bosco di sughera: (profili numero 17 e 18);
- e- vigneti abbandonati con ripristino in corso della vegetazione naturale 7 profili: (dal numero 19 al numero 25).

I campioni destinati alla determinazione della densità apparente sono stati prelevati mediante carotaggio di campioni di terreno di volume noto e la massa volumica apparente è stata calcolata, una volta essiccato il campione in stufa e pesato, secondo quanto indicato dalla metodologia ufficiale (MiPAF, 2000).

I campioni destinati alla determinazione della densità apparente sono stati prelevati utilizzando un cilindro avente dimensioni note; tale strumento è stato inserito orizzontalmente, in corrispondenza della parte mediana di ciascun orizzonte, sino al suo completo riempimento. Il cilindro è stato quindi estratto dal suolo, assicurandosi che la carota di terreno contenuta al suo interno avesse le stesse dimensioni del cilindro; il terreno presente dentro il cilindro è stato estratto e posto in buste di plastica per il suo trasporto in laboratorio.

Una volta in laboratorio i campioni sono stati posti in stufa ad una temperatura di 105°C sino a completa essiccazione e pesati.

A questo punto si è proceduto ad un primo calcolo della densità apparente che è stata corretta al fine di considerare il contenuto di scheletro presente in ogni campione.

7.2.1 Tassonomia dei suoli

Al momento non esiste un sistema unico di classificazione dei suoli.

Attualmente, a livello mondiale, si fa riferimento ad un numero ristretto di sistemi tassonomici: *Soil Taxonomy* USDA, *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) della FAO-ISSS, *Référentiel Pédologique* dell'INRA, Classificazione e Determinazione dei Tipi di Suoli russo.

Nell'ambito della caratterizzazione pedologica del bacino Berchidda-Monti i suoli sono stati classificati secondo la Soil Taxonomy e, per le correlazione con le altre tassonomie, si è fatto riferimento al WRB.

Nell'area di studio sono diffusi suoli di media potenza, sviluppatisi a spese di graniti fortemente alterati. Negli orizzonti profondi, indicati con la sigla Bw, sono particolarmente evidenti i risultati del processo di alterazione del substrato. Il complesso di scambio è di norma insaturo. Il contenuto di umidità dei suoli è caratterizzato da un forte deficit estivo (regime di umidità *xerico*), mentre quello delle temperature, è stato attribuito sulla base delle temperature medie ed annuali atmosferiche al regime *termico* (temperatura media annua del suolo 15°C - 22°C, differenze tra la temperatura media estiva e quella invernale del suolo > 5°C misurate alla profondità standard di 50 cm).

Questi suoli sono stati attribuiti al sottogruppo dei *Typic Dystroxerepts* dove:

- *epts.*, è la sillaba chiave dell'ordine degli *Inceptisuoli*, suoli nella fase iniziale di sviluppo caratterizzati da un orizzonte, denominato *cambico*, che è il risultato di profondi processi di alterazione del substrato;
- *Xerepts*, sottordine, in cui vengono ascritti gli *Inceptisuoli* caratterizzati da un regime di umidità del suolo *xerico*;
- *Dystroxerepts*, grande gruppo in cui ricadono gli *Xerepts* caratterizzati da un grado di saturazione in basi < 60% in tutti gli orizzonti compresi tra 25 e 75 cm dalla superficie del suolo;

- *Typic Dystraxepts*, sottogruppo in cui sono ascritti tutti i *Dystraxepts* le cui caratteristiche chimiche e fisiche corrispondono a quelle considerate come tipiche del sottogruppo.

I *Typic Dystraxepts* presenti nell'area Berchidda sono attribuibili alla famiglia *scheletrico-franca* (> 35% di scheletro), *mista* (< 40% di minerali diversi dal quarzo e dai feldspati), *non acida, termica*. Il nome della serie potrebbe essere *Stazzo Puntu d'Olia*.

Il WRB nella sua versione del 2006, rappresenta l'evoluzione più recente della Legenda FAO-UNESCO alla Carta Mondiale dei Suoli pubblicata a partire dal 1977.

Anche questo sistema prevede l'utilizzo degli orizzonti diagnostici e il ricorso a parole greche, latine o termini comunemente accettati dai pedologi per definire i suoli nei diversi livelli tassonomici. A differenza della Soil Taxonomy nel WRB non viene data importanza alcuna alle condizioni pedoclimatiche.

Il WRB prevede due livelli di classificazione dei suoli. Il più elevato è il *Soil Reference Group*, (*SRG*). L'attribuzione univoca di un suolo ad uno dei 32 *SRG* si basa sulla presenza di orizzonti diagnostici o di particolari condizioni fisiche del suolo, esempio scarsa profondità, presenza di ristagni idrici, ecc., definite *proprietà e materiali diagnostici*.

Nel secondo livello, definito come unità di secondo livello vengono specificate, mediante l'uso di aggettivi prefissi e suffissi al nome del *SRG*, le proprietà fisiche e chimiche e la presenza di proprietà e materiali diagnostici del singolo suolo.

Il WRB indica per ciascun *SRG* gli aggettivi utilizzabili sia come prefissi che suffissi.

Il tipo pedologico più comune nell'area "Berchidda-Monti" è stato attribuito agli *Haplic Endoleptic Cambisols (Dystric)* dove:

- *Cambisols*, è il *SRG* caratterizzato da una minima evoluzione del profilo e dalla presenza di un orizzonte cambico;
- *Haplic*, sono i *Cambisols* che non presentano caratteristiche accessorie;
- *Endoleptic*, *Cambisols* caratterizzati da una potenza complessiva compresa tra 50 e 100 cm;

- *Dystric*, proprietà diagnostica non determinabile in campo, indica la presenza di una percentuale di saturazione del complesso di scambio inferiore al 50% tra 20 e 100 cm di profondità.

7.3 CARATTERIZZAZIONE FLORISTICA E VEGETAZIONALE DELL'AREA DI STUDIO

Nell'ambito del progetto "Cambiamenti Climatici e Sistemi Produttivi Agricoli e Forestali: Impatto sulle Riserve di Carbonio e sulla Diversità Microbica del Suolo" denominato SOILSINK, la caratterizzazione botanica dell'area di studio è stata condotta attraverso la collaborazione con il Dipartimento di Botanica dell'Università di Sassari.

Le analisi floristiche sono state effettuate durante tutto l'arco dell'anno 2006 al fine di realizzare elenchi floristici il più possibile esaustivi; nell'area "Berchidda – Monti" sono state censite 241 entità vegetali. I campioni raccolti sono conservati presso l'Erbario del Dipartimento di Botanica ed Ecologia Vegetale dell'Università degli Studi di Sassari (SS). L'elenco floristico segue l'ordine alfabetico, la nomenclatura segue Pignatti (1982), Greuter *et al.* (1984-89), Tutin *et al.* (1964-80 e 1993), Valdés *et al.* (1987).

Le analisi vegetazionali hanno consentito di produrre dati quantitativi utili per caratterizzare le comunità vegetali e le loro reciproche relazioni spazio-temporali.

Tali analisi sono state effettuate con i diversi livelli del metodo fitosociologico:

- fitosociologia classica – individuazione e caratterizzazione floristico-vegetazionale delle comunità vegetali e loro inquadramento nel sistema sintassonomico;
- fitosociologia seriale – individuazione dei rapporti dinamici tra le comunità vegetale e ricostruzione della serie di vegetazione;
- fitosociologia catenale – individuazione delle serie che si trovano in contatto topografico con la serie indagata.

A) Fitosociologia classica

L'applicazione del metodo fitosociologico classico (Géhu e Rivas-Martínez, 1981) ha consentito di identificare le associazioni vegetali presenti nel territorio. Sono stati effettuati 55 campionamenti consistenti in inventari floristici e relativi valori di copertura per ciascuna specie, realizzati in aree con vegetazione uniforme. Il valore di copertura è stato attribuito a ciascuna specie presente nella superficie esaminata, secondo le classi di copertura definite da Braun-Blanquet (1951).

I rilievi sono stati successivamente riportati in una matrice 55 (campioni) x 241 (entità). A partire da questa è stata elaborata la matrice di somiglianza (Bray e Curtis, 1957) sulla quale è stata effettuata la cluster analysis al fine di individuare le affinità tra rilievi e gruppi di rilievi. Il risultato di questa elaborazione ha consentito di definire insiemi omogenei di rilievi corrispondenti a diverse comunità vegetali (associazioni). Il livello di presenza delle diverse entità, unitamente alla fedeltà (grado di legame di un'entità ad un gruppo), ha consentito di procedere all'inquadramento sintassonomico delle comunità vegetali studiate. Le associazioni sono state inserite in unità superiori di rango gerarchico crescente fino al livello superiore, quello di classe, che viene definita su basi ecologiche (Rivas-Martínez *et al.*, 2002).

Sono state riconosciute, caratterizzate e classificate diverse tipologie di comunità vegetali ripartite in 7 classi di vegetazione:

Stellarietea mediae – vegetazione annuale effimera ruderale. Nell'ambito di questa classe di vegetazione sono state individuate le comunità che si sviluppano nei vigneti lavorati e in quelli inerbiti e in alcune aree frequentate in maniera intensiva dagli animali al pascolo. Nei primi sono presenti comunità molto povere dal punto di vista floristico (27 specie), a sviluppo molto precoce, caratterizzate da una netta dominanza della cosmopolita *Spergula arvensis* L. Nei vigneti inerbiti sono invece presenti comunità più ricche dal punto di vista floristico (69 specie).

Poetea bulbosae – vegetazione strettamente legata al pascolo, in particolar modo ovino. È caratterizzata da un'elevata percentuale di emicriptofite e diverse specie annuali del genere *Trifolium*. Nelle aree campionate la ricchezza floristica è risultata pari a 84. Le comunità riferibili a questa classe di vegetazione occupano

vaste superfici in molti casi caratterizzate dalla presenza di copertura arborea (*Quercus suber*) molto rada (*dehesa*).

Tuberarietea guttatae – vegetazione pioniera primaverile dominata da specie annuali di piccola taglia non nitrofile. Le comunità vegetali riferibili a questa classe di vegetazione, che rappresentano la prima fase dinamica della serie su suoli nudi non disturbati, sono state individuate su piccole superfici dell'area di studio. Si presentano tuttavia floristicamente molto ricche (75 specie).

Artemisietea vulgaris - vegetazione erbacea perenne caratterizzata da un elevato contingente di emicriptofite e geofite che si sviluppa su aree precedentemente coltivate o utilizzate per il pascolo e successivamente abbandonate. Nell'area di studio si presenta molto diversificata dal punto di vista floristico (95 specie).

Cisto-Lavanduletea – vegetazione camefitica di gariga che si sviluppa prevalentemente in seguito alla distruzione della vegetazione potenziale sclerofillica determinata dal taglio degli alberi, dalle lavorazioni o dagli incendi. Le garighe più diffuse nell'area di studio sono quelle a dominanza di *Cistus monspeliensis*. In settori limitati sono presenti anche garighe basse, di recupero a dominanza di *Helichrysum italicum* subsp. *microphyllum* che si sviluppano su suoli decapitati (vigneti abbandonati) a matrice grossolana.

Cytisetea scopario-striati – vegetazione arbustiva seriale o permanente dominata da *Leguminosae* nano o microfanerofite. Le comunità riferibili a questa classe di vegetazione sono caratterizzate dalla dominanza di *Cytisus villosus* e costituiscono mantelli di contatto con i boschi o formazioni arbustive in aree aperte o con copertura arborea (*Quercus suber*) molto rada.

Quercetea ilicis – vegetazione sempreverde o decidua che si rinviene dal piano termo-mediterraneo al supra-mediterraneo da semiarido a umido. Comprende comunità arboree, alto arbustive e di macchia. A questa classe di vegetazione possono essere riferite nell'area di studio le formazioni boschive a *Quercus suber*, la macchia alta pre-forestale e alcune tipologie di arbusteti. Le sugherete potenziali, presenti in settori molto limitati, sono rappresentate da boschi di sughera maturi, densi, con strato erbaceo sciafilo, strato arbustivo e componente lianosa. Molto più diffuse sono invece le sugherete aperte, con copertura arborea del 60-80%, strato arbustivo con bassi valori di copertura, strato lianoso scarso o

assente, componente erbacea sciafila quasi completamente scomparsa a causa di lavorazioni meccaniche ripetute. Gli arbusteti pre-forestali sono rappresentati dalla macchia alta a *Erica arborea* ed *Arbutus unedo*. Le altre formazioni arbustive a dominanza di sclerofille costituiscono prevalentemente siepi edafo-igrofile a dominanza di *Rubus ulmifolius* e *Myrtus communis* ed edafo-mesofile a dominanza di *Rhamnus alaternus* e *Myrtus communis*.

B) Fitosociologia seriale

Per lo studio dei processi dinamici a scale temporali storiche o comunque brevi è stato utilizzato il metodo sinfitosociologico, che consente di evidenziare l'influenza dei processi antropici sulla vegetazione. La sinfitosociologia, o fitosociologia seriale (Rivas-Martínez, 1976), ha come oggetto di studio le associazioni legate da rapporti dinamici, in quanto rappresentano tappe successive di uno stesso processo evolutivo o regressivo, definito dalla serie di vegetazione (o sigmetum). Le dinamiche della successione secondaria sono quindi state concettualizzate mediante il modello della serie di vegetazione, che è costituita dall'insieme di tutte le associazioni legate da rapporti dinamici, che si rinvergono in uno spazio omogeneo con le stesse potenzialità vegetazionali: la tessella.

In base alle analisi effettuate si ritiene che la serie prevalente nell'area di studio sia la serie sarda centro-occidentale edafo-mesofila, mesomediterranea, della sughera (*Violo dehnhardtii-Quercus suberis* sigmetum). La testa di serie è rappresentata da mesobosco a dominanza di *Quercus suber* riferibile all'associazione *Violo dehnhardtii-Quercetum suberis* nella subass. *oenanthesum pimpinelloidis*, che include gli aspetti più mesofili dell'associazione, localmente arricchita dalla presenza di orniello (*Fraxinus ornus* L.).

La presenza della subass. mesofila *oenanthesum pimpinelloidis*, nell'area di studio, in un'area ad altitudine modesta ricadente nel piano fitoclimatico mesomediterraneo inferiore, è attribuibile al tipo di substrato geo-pedologico e al contatto topografico con corsi d'acqua (contatto catenale con ontanete igrofile).

Nell'ambito della serie sono state individuate le principali tappe regressive e alcune possibili deviazioni. La distanza delle comunità di sostituzione dalla

vegetazione naturale potenziale è stata valutata attraverso l'analisi delle corrispondenze. Questa ha consentito di ordinare i rilievi lungo un gradiente continuo, a partire da quelli relativi alle formazioni boschive più mature fino a quelli relativi ai vigneti inerbiti. I rilievi effettuati nei vigneti lavorati si dispongono invece all'esterno del gradiente.

Tra le comunità vegetali individuate all'interno dell'area di studio sono state scelte quelle più significative per superficie occupata o per distanza reciproca nei processi di recupero, come punti di riferimento per il campionamento del suolo da parte delle unità operative interessate.

C) Fitosociologia catenale

La serie della sughera nell'area di studio presenta contatti catenali con due serie edafoxerofile: la serie sarda, termomediterranea, dell'olivastro (*Asparago acutifolii-Oleo sylvestris* sigmetum) che si rinviene negli affioramenti rocciosi e la serie sarda, termo-mesomediterranea, del leccio (*Prasio majoris-Quercus ilicis* sigmentum) che si sviluppa a quote superiori e su versanti più acclivi. Lungo i corsi d'acqua la serie della sughera si pone invece in contatto catenale con il geosigmeto sardo-corso, edafoigrofilo, calcifugo (*Hyperico hircini-Alnenion glutinosae*)

D) Analisi lineare

Il metodo dell'analisi lineare permette di quantificare la composizione floristica rilevando la presenza delle specie lungo transetti (linee di flora) materializzati tramite una cordicella sottile.

I rilievi sono stati effettuati lungo linee di flora di lunghezza variabile mediante il contatto con un'asta calata verticalmente al suolo in corrispondenza di punti prestabiliti distribuiti regolarmente lungo la linea stessa (Daget e Poissonet, 1969). Ad ogni calata è stata inoltre rilevata l'altezza della specie che intersecava l'asta nel punto più alto.

A partire dai dati rilevati possono essere calcolati diversi parametri (Tabella 7.5).

Sono state realizzate analisi lineari nel vigneto inerbito e nel pascolo nel periodo del massimo sviluppo vegetativo e in corrispondenza dei rilievi per la quantificazione della fitomassa e del LAI massimo.

Nel vigneto le linee di flora sono state realizzate in 4 filari tenendo conto della posizione rispetto alle viti e alla fascia di azione del diserbante usato sulla fila. Nell'ambito di ogni filare sono state realizzate tre linee, una centrale e due laterali, per un totale di 12 linee con 25 punti di lettura ciascuna.

Nel pascolo, al fine di valutare la composizione floristica in presenza ed in assenza di pascolamento, sono stati realizzati 3 recinti di esclusione aventi dimensioni di 10 × 10 m. Le linee di flora sono state realizzate sia all'interno di ciascun recinto (4 linee da 20 punti ciascuna per ciascun recinto) che al loro esterno, nelle immediate vicinanze (4 linee da 20 punti ciascuna per ciascun recinto), per un totale di 24 linee.

Tabella 7.5 - Parametri rilevati e calcolati col metodo dell'analisi lineare

Parametro	sigla	Significato
Frequenza Specifica	FS	punti di rilevamento in cui è presente la specie
Frequenza Centesimale	FC	FS/(n. totale di punti rilevati)*100
Contributo Specifico di Presenza	CSP	FC/ totale FC
Ricoprimento globale	R	n. di punti con presenza di vegetazione/n. punti rilevati

I risultati conseguiti con questi rilievi costituiscono la base di conoscenza per l'interpretazione dei rilievi effettuati sul suolo.

Una sintesi dei risultati ottenuti e relativi al sito con prevalente uso del suolo a pascolo è riportata nella tabella 7.6.

Tabella 7.6 - Elenco delle specie presenti in ordine di abbondanza (CSP medio)

PASCOLO

- 1) *Hordeum leporinum* Link
 - 2) *Trifolium subterraneum* L.
 - 3) *Trifolium nigrescens* Viv.
 - 4) *Sisymbrium officinale* (L.) Scop.
 - 5) *Agrostis salmantica* (Lag.) Kunth
-

7.4 CARATTERIZZAZIONE AGRONOMICA

Nell'ambito dell'area di studio sono state individuate differenti tipologie di uso del suolo ed in particolare, rispettivamente con livello crescente di intensivizzazione dell'attività agricola: sughereta, vigneto abbandonato, pascolo, erbaio vigneto inerbito e vigneto lavorato. Per ciascuna tipologia di uso del suolo è stata inoltre determinata la sua incidenza in termini di percentuale di superficie interessata nell'ambito dell'area di studio.

Secondo il criterio della rappresentatività ed in relazione alle caratteristiche pedologiche, vegetazionali e di gestione, è stato individuato un campo sperimentale per ciascuna tipologia di uso suolo. Sui sei campi sperimentali è stata avviata la caratterizzazione agronomica.

La prima fase ha previsto la conduzione di numerose interviste, progressivamente caratterizzate da un livello di approfondimento crescente. Attraverso il contatto diretto con i proprietari e/o conduttori, è stato possibile acquisire informazioni storiche relative alla gestione delle superfici, oltre che dati preziosi relativi alla gestione presente, quali ad esempio il carico di bestiame, il piano di concimazione adottato nell'annata 2006/07 ecc.

Si riporta di seguito, per i diversi campi sperimentali, il numero di anni in cui la gestione si è mantenuta invariata:

- sughereta: >30 anni;
- pascolo: >30 anni;
- erbaio: 30 anni;
- vigneto inerbito: 22 anni;

- vigneto lavorato: 13 anni;
- vigneto abbandonato: impiantato tra il 1943 e il 1951. Abbandonato nel 1976 (31 anni).

L'attività è stata condotta secondo una precisa scala temporale, temporale in funzione delle fasi fenologiche ed alle operazioni colturali. Tali informazioni sono state inserite in un archivio informatizzato. All'interno di ciascun campo sperimentale sono state individuate numerose aree da impiegare per il campionamento entro tipologia di uso suolo, secondo il modello statistico del sottocampionamento. In particolare, nel campo sperimentale relativo al pascolo si è resa necessaria la costruzione di 3 recinti per l'esclusione degli animali dal pascolamento, al fine di disporre della copertura vegetale naturale in condizioni indisturbate anche nella primavera inoltrata.

Nel corso del primo anno di attività, sono state rilevate e/o monitorate diverse variabili allo scopo di caratterizzare dal punto di vista agronomico le diverse tipologie di uso del suolo; in particolare sono stati acquisiti i dati relativi alle caratteristiche fisico-chimiche del suolo, all'avvicendamento colturale, alle pratiche agronomiche in uso, alla produttività delle colture, al contenuto di N e C nei residui colturali e nel prodotto asportato.

Di seguito si riportano in forma sintetica, sotto forma di scheda, le informazioni ottenute tramite intervista e relative a ciascuna tipologia di uso del suolo:

Scheda vigneto lavorato

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 525394 4519336 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 275 m s.l.m.

Superficie: 0,98 ha

Anno di impianto: 1994

Vitigno: Vermentino

Forma di allevamento: guyot. Sulle piante al momento della potatura vengono lasciate in media 5 -7 gemme per pianta.

Distanze di impianto: 2,5 x 1,3 m.

Lavorazioni: il terreno viene regolarmente lavorato dal 1994.

Tipo di lavorazioni: viene effettuata una fresatura e una lavorazione mediante l'utilizzo di un piccolo coltivatore subito dopo la potatura (fine febbraio). Una seconda fresatura viene normalmente effettuata tra il mese di maggio e quello di giugno ed una eventuale terza lavorazione

è eseguita in luglio/agosto. Viene inoltre effettuata una sola operazione di scalzatura nel periodo di marzo/aprile.

Potatura: viene effettuata manualmente nel periodo compreso tra la fine del mese di gennaio ed i primi giorni di febbraio. Anche le operazioni di potatura verde sono effettuate manualmente. I residui di potatura vengono allontanati dal campo.

Concimazione: in passato la concimazione era condotta mediante la distribuzione di un concime per l'agricoltura biologica avente la seguente composizione:

- 12,5 % di N organico,
- 40% di C organico,
- 70% di sostanza organica,
- pH: 4,
- rapporto C/N pari a 3,2.

Quantità e tempi di somministrazione: 5 q/ha distribuiti alla fine del mese di gennaio.

Irrigazione: il vigneto in esame non è dotato di impianto di irrigazione.

Trattamenti fitosanitari: durante il periodo estivo vengono effettuati dei trattamenti utilizzando zolfo ramato (5%) in funzione degli eventuali eventi piovosi o della presenza di condizioni meteorologiche/ambientali che possano favorire l'insorgere di malattie crittogamiche.

Raccolta: viene normalmente effettuata verso la fine del mese di settembre e mediamente la produzione è di circa 10 t ha⁻¹.

Nell'annata 2007 la produzione è stata ridotta a circa 6 t ha⁻¹ a causa dei danni alle gemme dovuti a vento freddo.

NOTE: occasionalmente si possono verificare danni da gelo e raramente danni da grandine.

Scheda vigneto inerbito (inerbimento naturale)

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 524669 4518989 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 286 m s.l.m.

Superficie: 3,4 ha

Anno di impianto: parte sud: 1991; parte nord: 1985.

Vitigno: Vermentino

Forma di allevamento: spalliera. Sulle piante al momento della potatura vengono lasciate in media 12 - 15 gemme per pianta che possono arrivare a circa 20 gemme per pianta considerando quelle presenti sulle femminelle.

Distanze di impianto: 2,5 x 1 m. (densità d'investimento: 4000 piante ha⁻¹).

Lavorazioni: data la presenza dell'inerbimento naturale permanente non viene effettuata alcuna lavorazione del terreno. Le uniche lavorazioni effettuate riguardano la trinciatura della cotica erbosa nel periodo tardo primaverile ed in quello invernale.

Potatura: intervento manuale verso la fine di gennaio (in alcuni anni precedenti a marzo).

I residui di potatura vengono trinciati e lasciati in campo.

Un intervento di cimatura viene effettuato tra la fine del mese di giugno e i primi di luglio, generalmente prima che i tralci vadano ad occupare l'interfila. Il taglio viene effettuato a circa 15 cm nella parte superiore e circa 10-15 cm lateralmente. Tale lavorazione è effettuata meccanicamente.

I residui dei due interventi di potatura vengono lasciati in campo e trinciati unitamente alla fitomassa presente in campo.

Diserbo sulla fila: vengono effettuati da uno a due trattamenti con Glyphosate.

Concimazione: da due anni non vengono effettuate concimazioni. Nelle annate precedenti venivano distribuiti $2,5 \text{ q ha}^{-1}$ di concime ternario avente titolo 11-22-16. Nell'annata in corso (2008) è stata effettuata una concimazione in pre-fioritura utilizzando un concime ternario con titolo 24 – 6 – 12 in dosi di 5 q ha^{-1} in concimazione fogliare.

Irrigazione: il vigneto è dotato di impianto per irrigazione localizzata con metodo "a goccia". Sono adottati gocciolatori aventi una portata di 4 l ora^{-1} posizionati a 1 metro di distanza. I volumi stagionali ed il turno irriguo sono estremamente variabili in funzione dell'andamento meteorologico dell'annata. Vengono effettuati con lo scopo di evitare l'insorgenza di stress idrico alle piante. A titolo di esempio si riporta che nel 2006 è stata effettuata una sola irrigazione di soccorso con un adacquamento di 24 ore. Solitamente viene effettuato un primo intervento della durata di 24 h e interventi seguenti di 12 h con un massimo di 2 interventi.

Trattamenti fitosanitari: vengono effettuati trattamenti con prodotti sistemici contro le principali crittogame (oidio e peronospera). Vengono inoltre effettuati con Mancozeb contro l'escoriosi.

Raccolta: viene normalmente effettuata verso la fine del mese di settembre e mediamente la produzione è di circa 10 t ha^{-1} .

Scheda pascolo

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 524765 4518635 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 285 m s.l.m.

Superficie: 11 ha

Specie presenti: sono presenti specie appartenenti alla famiglia delle Graminacee tra le quali la più abbondante è risultato l'*Hordeum leporinum*, inoltre si ritrovano specie appartenenti alla famiglia delle Leguminose come ad esempio il *Trifolium michelianum*, *T. subterraneum*, *T. resupinatum*.

Gestione: il terreno viene destinato all'alimentazione diretta (pascolamento) degli ovini. Il carico medio è pari a circa 30 capi per ettaro in quanto l'intera superficie viene divisa in 3 settori aventi superficie di circa 4 ha ciascuno. L'intera superficie viene divisa in settori all'interno dei quali vengono introdotti gli animali. Il terreno viene arato e seminato quando si verifica un notevole degrado della composizione floristica della cotica erbosa e questa operazione di norma viene effettuata ogni 4 - 5 anni. Il pascolamento ha mediamente avvio nel mese di dicembre e viene sospeso nei mesi di maggio – giugno, in funzione dell'andamento meteorologico.

Concimazione: viene effettuata esclusivamente una concimazione a base di solfato di potassio. Tale concimazione viene effettuata con un intervento all'anno eseguito alla metà del mese di gennaio distribuendo 1 q ha^{-1} .

Scheda erbaio

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 524412 4518520 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 300 m s.l.m.

Superficie: 3,5 ha

Specie presenti: avena, loglio, trifoglio micheliano.

Gestione: il terreno viene destinato al pascolamento degli animali (ovini) una sola volta all'anno e successivamente la fitomassa prodotta viene sfalcata, lasciata essiccare in campo (fienagione) sino al raggiungimento di un contenuto di umidità pari a circa il 14% e successivamente pressata mediante la formazione di balle a sezione circolare. Durante il pascolamento il carico medio è pari

a circa 30 capi per ettaro in quanto solamente una parte del gregge (circa un terzo) viene introdotto su questa superficie. La gestione di tale superficie prevede la periodica interruzione (ogni 4/5 anni) della coltivazione dell'erbaio e lo sfruttamento della cotica naturale con il pascolamento. Questo avviene nelle annate in cui la superficie normalmente destinata al pascolo, appartenente allo stesso proprietario e precedentemente descritta, è coltivata ad erbaio. Il pascolamento dell'erbaio viene effettuato a partire dal mese di dicembre e prosegue fino alla seconda metà del mese di marzo per circa 2 ore al giorno.

Tecnica colturale

- aratura mediante aratro a dischi ad una profondità di circa 30 cm;
- semina dell'avena negli ultimi giorni del mese di ottobre (1 q ha^{-1}) e concimazione con concime binario avente titolo 18-46 in dose di 2 q ha^{-1} ;
- erpicatura mediante erpice a catena effettuando 2 -3 lavorazioni incrociando la direzione di marcia;
- semina del loglio e del trifoglio, in miscuglio con dose di seme pari rispettivamente a: 30 kg ha^{-1} e 25 kg ha^{-1} e concimazione con concime binario avente titolo 18-46 in dose di 2 q ha^{-1} nei primi giorni di novembre;
- erpicatura mediante erpice a catena effettuando 2 -3 lavorazioni incrociando la direzione di marcia.
- la concimazione prevede la distribuzione di un concime binario con titolo 18-46. Tale operazione viene effettuata alla semina distribuendo 2 q ha^{-1} di fertilizzante.

Scheda sughereta

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 524611 4519000 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 300 m s.l.m.

Superficie: 15 ha

Specie presenti: la copertura erbacea è rappresentata prevalentemente da avena, loglio, trifoglio, orzo (da tre anni non viene effettuata la semina). Sono inoltre presenti formazioni arbustive riconducibili alla macchia mediterranea.

Utilizzo: il terreno viene sfruttato anche con il pascolamento di bovini. Il carico è di 20 – 25 capi su tutta la superficie. Il pascolamento viene effettuato per un solo mese l'anno.

Gestione: la gestione del pascolo varia in funzione dell'andamento meteorologico. L'aratura viene eseguita solamente prima della semina; attualmente il terreno non viene arato dal 2004.

Concimazione: viene effettuata una fertilizzazione mediante la distribuzione di fosfato biammonico (18-46) in ragione di 1 q ha^{-1} e in corrispondenza dell'aratura.

Scheda vigneto abbandonato

Ubicazione: comune di Berchidda

Coordinate: 32T 523965 4518876 (sistema di riferimento: UTM 32)

Altitudine: 340 m s.l.m.

Anno di impianto: Il vigneto è stato impiantato in due epoche: una, la più a nord, intorno al 1940 mentre quella più a sud è stata impiantata nel 1951.

Vitigno: Nuragus nel settore nord e vernaccia nel settore sud.

Forma di allevamento: alberello con 3 gemme selezionate alla potatura.

Distanze di impianto: $1,50 \div 1,80 \times 1 \text{ m}$.

Gestione del vigneto: aratura annuale con aratro trainato da buoi eseguita nei mesi di dicembre - gennaio. Nel mese di giugno veniva effettuato il diserbo alla base delle viti e la rincalzatura.

Trattamenti fitosanitari: trattamenti anticrittogamici mediante la distribuzione di zolfo e solfato di rame.

Dal 1975-'76 è iniziato il progressivo abbandono del vigneto, che in pochi anni è risultato definitivo. Prima dell'impianto del vigneto il terreno era occupato da un cisteto, gestito attraverso il pascolamento ed interventi occasionali di controllo della flora infestante.

7.5 CAMPIONAMENTO ED ANALISI

7.5.1 Schema di campionamento

Le due specifiche aree (pascolo ed erbaio) oggetto di studio della tesi di dottorato sono state campionate nella primavera del 2008; i rilievi sul pascolo hanno interessato un'area avente superficie pari a 0.81 ha, secondo una maglia quadrata 15 x 15m per un totale di 40 aree di saggio mentre nell'erbaio è stata campionata una superficie pari a 1.83 ha, per un totale di 85 punti di campionamento. Le coordinate di tutte le aree di saggio sono state derivate dal SIT ed inserite in un Sistema di Posizionamento Globale (GPS) che ha permesso di identificare correttamente i punti di campionamento in campo. Le carte in figura 7.2 e 7.3 rappresentano l'ubicazione dei campioni.

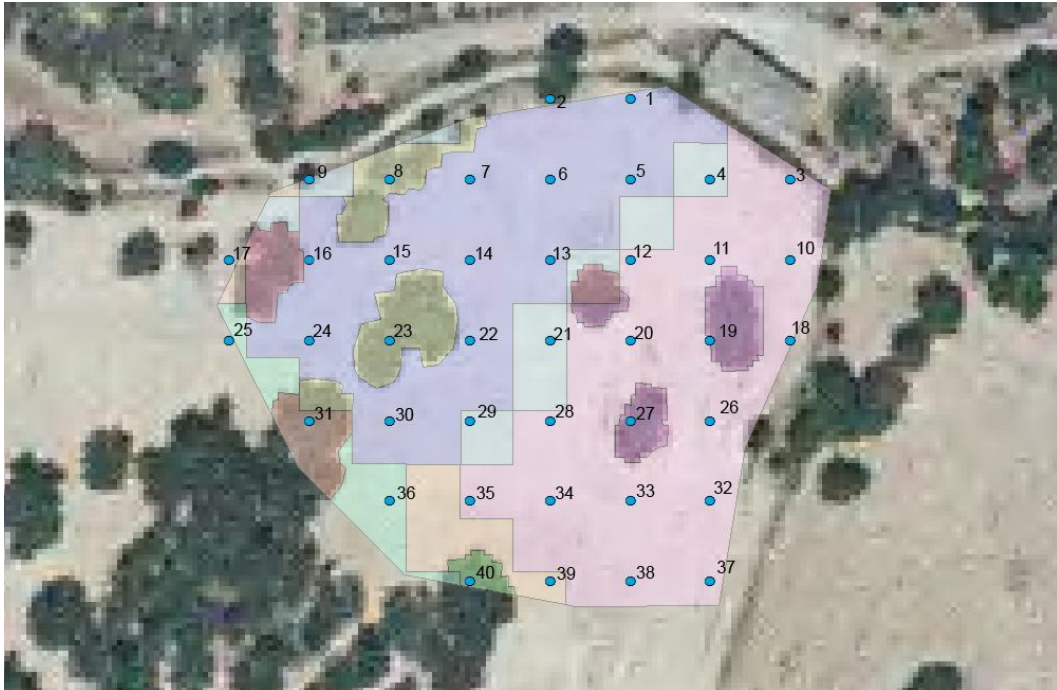


Figura 7.2 - Pascolo, ubicazione dei siti di prelievo dei campioni. Sono evidenziate in tonalità di colore differenti le aree omogenee per pendenza, esposizione e copertura vegetale

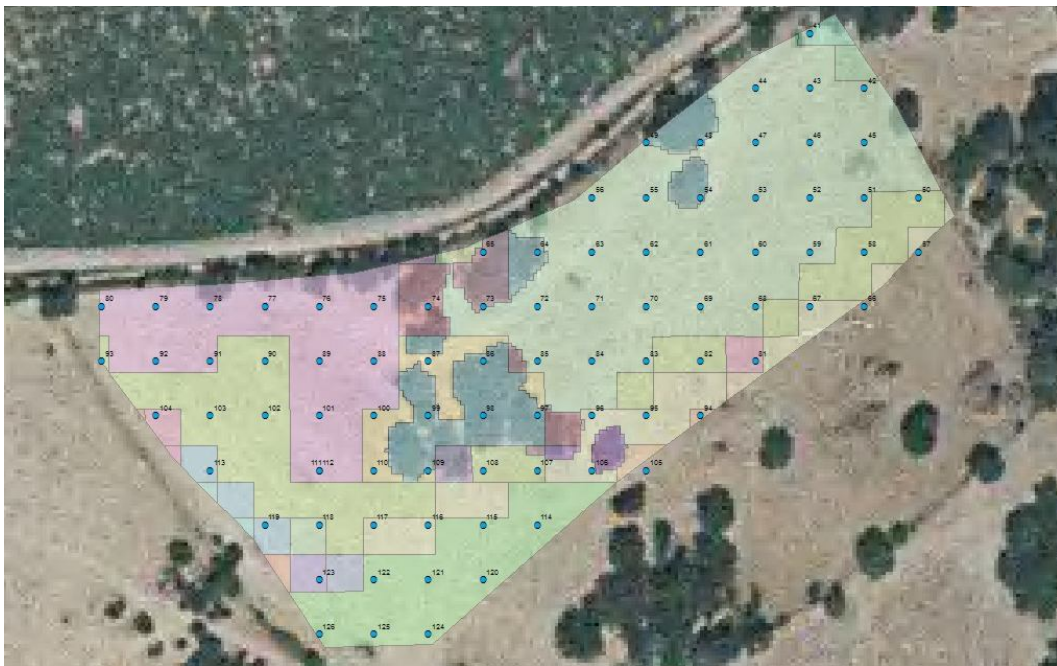


Figura 7.3 - Erbaio, ubicazione dei siti di prelievo dei campioni. Sono evidenziate in tonalità di colore differenti le aree omogenee per pendenza, esposizione e copertura vegetale

Il terreno è stato campionato fino ad una profondità di 40 cm; sono stati prelevati 4 campioni per ogni area di saggio, rispettivamente alle profondità 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm mediante un carotatore manuale (figura 7.4). Nell'area di saggio

numero 9 non è stato possibile prelevare il campione alle profondità 20-30 e 30-40 cm a causa della scarsa profondità del suolo.

I campioni sono stati posti in bustine di plastica e catalogati per il trasporto in laboratorio.



Figura 7.4 - Alcune fasi del campionamento del suolo

7.5.2 Analisi di laboratorio

I campioni, privati dei residui di radici e dei residui animali (>1mm) sono stati essiccati in stufa in ventilazione forzata, pesati e setacciati a 2mm. I campioni setacciati sono stati pesati per determinare il peso dello scheletro.

La concentrazione di carbonio organico è stata determinata secondo il metodo Walkley – Black mentre la granulometria è stata determinata per setacciatura ad umido e sedimentazione (Metodo della pipetta). Le analisi sono state eseguite secondo i metodi del MiPAF, 2000.

La densità apparente (BD) della terra fine è stata stimata tramite una funzione di pedotrasferimento in quanto le caratteristiche del terreno hanno impedito l'utilizzo

degli appositi cilindri a volume noto indispensabili per la determinazione della densità apparente.

Le “pedotransfer functions” (PTFs) sono dei modelli matematici sviluppati per la stima delle proprietà idrauliche dei suoli, in quanto le procedure tipicamente impiegate per la misura in campo di tali proprietà sono molto dispendiose, sia in termini economici che in termini di tempo ed energie necessarie. Tali modelli sono in grado di fornire una stima della curva di ritenzione a partire da proprietà dei suoli facilmente misurabili e a costi inferiori, quali la tessitura, il contenuto in sostanza organica e la densità apparente, ma possono essere utilizzate anche per la stima della densità apparente del terreno.

Tra le diverse alternative è stata scelta la PTF di Saxton, (Saxton et al., 1986) in quanto essa risulta particolarmente adatta per terreni a tessitura tendenzialmente sabbiosa, quali quelli in esame. La capacità di stima della PTF è stata testata mediante utilizzo della stessa per la stima della densità apparente dei profili di suolo aperti per la caratterizzazione pedologica dei siti di studio. Il confronto tra i dati di densità apparente misurati e quelli stimati ha confermato la buona capacità di stima della pedotransfer in questione.

Lo stock di carbonio organico del suolo (g) per ogni punto campionato è stato calcolato come segue:

$$SOC_{stocks} = \sum_{i=1}^n DA_{terrafine,i} \times SOC_{conc,i} \times volume_{terrafine,i}$$

dove n è il numero di intervalli di profondità di suolo campionati, $DA_{terrafine,i}$ rappresenta la densità apparente espressa in g/cm^3 per i diversi intervalli i , $SOC_{conc,i}$ rappresenta la concentrazione di carbonio organico (%) per ogni intervallo i di profondità e $volume_{terrafine,i}$ indica il volume di terra fine presente nel volume di suolo di riferimento.

7.5.3 Analisi statistica e geostatistica dei dati

Le variabili misurate sono state preventivamente caratterizzate mediante analisi statistica classica descrittiva, senza tenere conto della natura spaziale dei dati; successivamente si è proceduto all’analisi geostatistica, che è stata effettuata con il software ISATIS 6.0.1 (Geovariances).

Lo studio geostatistico è stato sviluppato attraverso le seguenti fasi:

- Analisi della variografia della variabile “stock di carbonio organico nel suolo” per identificare la correlazione spaziale tra le osservazioni;
- Ricerca di un modello teorico in grado di descrivere la correlazione spaziale;
- Studio dei diagrammi a dispersione per identificare la presenza di valori anomali che disturbano la stima della correlazione spaziale;
- Stima del valore della variabile nei punti non campionati mediante kriging;
- Elaborazione delle mappe che visualizzano il comportamento della variabile spaziale nell'intero dominio di studio.

8 RISULTATI E DISCUSSIONE

8.1 CARATTERIZZAZIONE PEDOLOGICA DELL'AREA "BERCHIDDA-MONTI"

Il substrato pedogenetico dell'area di studio è costituito da graniti con cristalli a grana media, interessati dalla presenza localizzata di filoni di quarzo e di porfidi. La morfologia dell'area "Berchidda – Monti" varia dalla ondulata alla pianeggiante. I processi di erosione idrica incanalata sono evidenti solo negli erbai realizzati su pendenze superiori al 15 % circa e nell'area di saggio del vigneto abbandonato in condizioni di pendenze elevate e di scarsa copertura vegetale.

Tutti i profili aperti hanno una successione di orizzonti del tipo A-Bw-C o A-Bw-BC-C o più raramente A-Bw-R.

La potenza dei profili, limitatamente ai soli orizzonti A e Bw, varia da un minimo di 38 cm nel profilo 2 ad un massimo di 100 nel 14.

Nei profili 1, 2, 4, 7, 10, 12, il passaggio tra gli orizzonti A e Bw ed il substrato alterato è graduale per la presenza di un orizzonte BC, dalla tessitura grossolana, la cui potenza varia dai 30 cm circa nel profilo 10 ai 90 cm del profilo 16.

Il contatto diretto con la roccia madre inalterata, orizzonte R, è stato osservato solo nei due profili 3 e 25.

Le classi tessiturali prevalenti sono la sabbioso-franca e la franco-sabbiosa.

Tessiture franco-sabbioso-argillose sono state osservate nell'orizzonte Bw del profilo 18 e nell'orizzonte BC del profilo 16 dove è stato osservato il più elevato valore in argilla fra i campioni analizzati: 20,3%.

Il contenuto di sostanza organica negli orizzonti A non è mai molto elevato, con valore medio intorno al 3% circa. I valori massimi di sostanza organica sono 8,6% nell'orizzonte A del profilo 17 e 11,8%, sempre dell'orizzonte A, del profilo 18. Entrambi i profili sono stati aperti all'interno di un bosco disetaneo di sughera.

Il complesso di scambio, in accordo con il ridotto contenuto in argille nella frazione terra fine, non è mai elevato.

Il grado di saturazione in basi è in prevalenza inferiore al 60% (condizioni *distriche* della Soil Taxonomy USDA). Fanno eccezione i profili 5, 6, 7, (vigneto

inerbito) 8 (pascolo) e 21 (vigneto abbandonato con una copertura vegetale costituita da macchia a cisto molto fitta).

I profili, aventi complesso di scambio con un grado di saturazione in basi inferiore al 60% in tutti gli orizzonti compresi tra 25 e 75 cm, sono stati classificati come *Typic Dystraxepts* (Key to Soil Taxonomy, 2006). I restanti sono stati classificati come *Typic Haploxerepts*.

Secondo il WRB (2006) i profili sono classificabili rispettivamente come *Haplic Endoleptic Cambisols (Dystric)* e *Haplic Endoleptic Cambisols (Eutric)*.

Le principali informazioni derivanti dalla descrizione dei profili e dalle analisi fisico chimiche dei campioni prelevati, sono riportate nelle tabelle da 8.1 a 8.12.

Tabella 8.1 - Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nel vigneto lavorato

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
1	32 T 525503-4519356	280	< 1	S (170° N)	ben drenato	Vigneto lavorato	Ap	0-17 / 17	Typic Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	17-40 / 23		
							BC	40-85÷95 / 45÷55		
							C	85÷95->120 / >35		
2	32 T 525464-4519323	278	2 - 4	SE (140° N)	ben drenato	Vigneto lavorato	Ap	0-18 / 18	Typic Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	18-36 / 18		
							BC	36-100 / 64		
							C	100->120		
3	32 T 525443-4519302	276	2 - 4	SE (140° N)	ben drenato	Vigneto lavorato	Ap	0-16 / 16	Typic Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	16-65 / 49		
							R	> 65 / "		
4	32 T 525436-4519328	289	2 - 4	SE (140° N)	ben drenato	Vigneto lavorato	Ap	0-25 / 25	Typic Dystrocherepts	Typic Dystrocherepts
							Bw	25-70 / 45		
							BC	70-110 / 40		
							C	110->140 / >30		

Tabella 8.2 - Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nel vigneto inerbito

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
5	32 T 524739-4519129	290	2 - 6	E (080° N)	ben drenato	Vigneto inerbito	Ap	0-30 / 30	Typic Dystroxepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	30-70 / 40		
							C	70-120 / 50		
6	32 T 524709-4519147	293	2 - 6	SE (120° N)	ben drenato	Vigneto inerbito	Ap	0-25 / 25	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							Bw	25-85 / 60		
							C	85-120 / 35		
							R	>120 / "		
7	32 T 524668-4519160	294	6 - 12	SE (160° N)	ben drenato	Vigneto inerbito	Ap	0-14 / 14	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							A2	14-38 / 24		
							BC	38-80 / 42		
							C	> 80 / "		

Tabella 8.3 - Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nel pascolo

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
8	32T 524452-4518658	305	6 - 12	O (260° N)	ben drenato	Pascolo	Ap	0-40 / 40	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							Bw	40-95 / 55		
							C	95-150 / 55		
9	32T 524420-4518642	302	6 - 12	SE (150° N)	ben drenato	Pascolo	Ap	0-55 / 55	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							Bw	55-125 / 70		
							C	95-150 / 55		
10	32T 524415-4518633	302	6 - 10	SO (250° N)	ben drenato	Pascolo	Ap	0-42 / 42	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							Bw	42-100 / 58		
							BC	100-130 / 30		
							C	130- >150 / >20		
11	32T 524415-4518526	284	12 - 18	SO (210° N)	ben drenato	Pascolo	Ap	0-30÷55 / 30÷55	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							Bw	55-125 / 80		
							C	80-130 / 50		
12	32T 524412-4518520	285	12 - 18	SO (210° N)	ben drenato	Pascolo	Ap	0-35 / 35	Typic Dystroxepts	Typic Dystroxepts
							BC	35-125 / 90		
							C	>125 / "		

Tabella 8.4 - Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nell'erbaio

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
13	32T 524733-4518581	307	6 - 12	NE (40° N)	ben drenato	Erbaio	Ap	0-35 / 35	Typic Dystrocherepts	Typic Dystrocherepts
							Bw	35-45÷66 / 10÷31		
							C	45÷66-110 / 44÷65		
14	32T 524767-4518612	306	6 - 12	NE (40° N)	ben drenato	Erbaio	A	0-25 / 25	Typic Dystrocherepts	Typic Dystrocherepts
							Bw	25-50÷65 / 25÷40		
							C	65-100÷130 / 35÷65		
15	32T 524765-4518635	305	6 - 12	NE (50° N)	ben drenato	Erbaio	A	0-35 / 35	Typic Dystrocherepts	Typic Dystrocherepts
							Bw	35-85÷100 / 50÷65		
							C	100-110 / 10		
16	32T 524787-4518698	304	2 - 6	NE (50° N)	ben drenato	Erbaio	A1	0-14 / 14	Typic Dystrocherepts	Typic Dystrocherepts
							A2	14-38 / 24		
							BC	38-120 / 82		
							C	> 120 / "		

Tabella 8.5 Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nella sughereta

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
17	32T 524615-4518997	319	12 - 18	SE (130° N)	ben drenato	Bosco di sughera	A1	0-3 / 3	Lithic Xerorthens	Haplic Lithic Leptosols Dystric
							A2	3-15 / 12		
							C1	15-40 / 25		
							C2	40-80 / 40		
18	32T 524623-4519021	319	12 - 18	E (80° N)	ben drenato	Bosco di sughera	A1	0-4 / 4	Lithic Xerorthens in complesso con Lithic Dystroxerepts	Haplic Epiletic Cambisols Dystric
							A2	4-25 / 21		
							Bw	21-65 / 44		
							C	65-100 / 35		

Tabella 8.6 - Schema riassuntivo dei dati relativi ai profili aperti nel vigneto abbandonato

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
							Tipo	Profondità / spessore (cm)	USDA	WRB
19	32T 523978-4518885	340	12 - 16	S (170° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-27 / 27	Lithic Dystroxerepts in complesso con Typic Dystroxerepts	Haplic Epileptic Cambisols Dystric in complesso con Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	27-53 / 26		
							C	53- >120 / >67		
20	32T 523950-4518888	340	16 - 30	SE (135° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-37 / 37	Typic Dystroxerepts	Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	37-60 / 23		
							C	60- >100 / >40		
21	32T 523960-4518886	340	16 - 30	SE (140° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-30 / 30	Typic Dystroxerepts	Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	30-60 / 30		
							C	60- >100 / >40		
22	32T 523962-4518875	335	16 - 30	S (185° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-30 / 30	Typic Dystroxerepts	Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	30-55 / 25		
							C	55- >100 / >45		
23	32T 523983-4518851	335	16 - 30	S (170° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-25 / 25	Lithic Dystroxerepts in complesso con Typic Dystroxerepts	Haplic Epileptic Cambisols Dystric in complesso con Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	25-55 / 30		
							C	55- >100 / >45		
24	32T 523974-4518838	330	16 - 30	SE (140° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-25 / 25	Typic Dystroxerepts	Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	25-65 / 40		
							C	65- >120 / >55		
25	32T 523986-4518835	330	> 30	SE (155° N)	ben drenato	Vigneto abbandonato	A	0-10 / 10	Typic Dystroxerepts	Haplic Endoleptic Cambisols Dystric
							Bw	10-45 / 35		
							R	> 45		

Tabella 8.7 - Schema riassuntivo dei risultati delle analisi fisico chimiche effettuate sui campioni di terreno prelevati nei profili aperti nel vigneto lavorato

		Profilo 1				Profilo 2				Profilo 3		Profilo 4			
Riferimento		2149	2150	2151	2152	2145	2146	2147	2148	2143	2144	2153	2154	2155	2156
Profilo/Orizzonte		Ap	Bw	BC	C	Ap	Bw	Bc	C	Ap	Bw	Ap	Bw	BC	C
ANALISI FISICO-MECCANICHE															
Scheletro (>2 mm)	(g/Kg)	511	635	455	578	515	516	607	466	510	416	647	640	587	747
Sabbia molto grossa (2÷1 mm)	(g/Kg)	118	62	142	155	142	108	97	188	105	128	102	112	124	97
Sabbia grossa (1÷0,5 mm)	(g/Kg)	67	46	96	69	98	77	65	138	71	95	60	67	55	47
Sabbia media (0,5÷0,25 mm)	(g/Kg)	70	47	97	67	193	90	62	123	74	90	47	46	63	32
Sabbia fine (0,25÷0,02 mm)	(g/Kg)	605	680	524	641	427	515	662	499	565	563	574	584	663	762
Limo (0,02÷0,002 mm)	(g/Kg)	25	48	55	10	5	79	41	10	51	8	112	78	5	17
Argilla (<0,002 mm)	(g/Kg)	115	117	85	58	135	132	74	43	135	116	105	114	90	45
ANALISI CHIMICHE															
pH (H ₂ O)		5,2	5,1	6,1	6,2	5,1	5,4	6,0	6,5	4,9	4,9	5,1	5,5	6,0	6,2
pH (KCl)		3,8	3,6	3,6	3,6	3,9	4,0	4,0	4,3	3,8	3,7	3,9	3,9	4,0	4,1
Calcare totale	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Calcare attivo	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Carbonio	(g/Kg)	11	9	2		23	8	10		11	17	12	7	2	
Sostanza organica	(g/Kg)	19	15	4		39	14	17		19	29	21	12	4	
Azoto totale	(g/Kg)	0,8	0,9	0,5		1,2	1,0	0,3		1,0	1,1	1,0	0,4	0,4	
C/N		14	10	4		19	8	5		11	15	13	18	28	
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅) corretti	(mg/Kg)	63	68	11		88	34	25		90	66	83	22	23	
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅)	(mg/Kg)	58	63	11		80	32	24		82	61	76	21	22	
COMPLESSO DI SCAMBIO															
Ione Calcio	(meq/100 g)	5,15	4,99	4,21		3,12	3,43	6,24		2,03	1,09	4,99	2,50	5,15	
Ione Magnesio	(meq/100 g)	1,05	1,11	1,75		0,44	1,08	1,08		0,26	0,57	0,80	0,23	1,52	
Ione Sodio	(meq/100 g)	0,27	0,16	0,16		0,43	0,33	0,49		0,60	0,16	0,82	0,65	0,33	
Ione Potassio	(meq/100 g)	0,29	0,06	0,13		0,19	0,16	0,10		0,16	0,03	0,32	0,03	0,16	
Somma basi di scambio	(meq/100 g)	6,76	6,32	6,25		4,18	5,00	7,90		3,04	1,85	6,92	3,41	7,15	
C.S.C.	(meq/100 g)	14,40	15,10	23,90		13,2	16,45	12,54		12,7	14,8	9,56	10,40	19,89	
G.S.B.	(%)	47	42	26		32	30,37	63		24	12	72	25	36	
Acidità di scambio	(meq/100 g)	7,76	8,73	17,65		9,00	11,46	4,64		9,62	12,97	2,64	10,54	12,74	

Tabella 8.8 - Schema riassuntivo dei risultati delle analisi fisico chimiche effettuate sui campioni di terreno prelevati nei profili aperti nel vigneto inerbito (profili 5,6 e 7) e nella sughereta (profili 17 e 18)

		Profilo 5			Profilo 6			Profilo 7			Profilo 17		Profilo 18		
Riferimento		2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2193	2194	2195	2196	2197
Profilo/Orizzonte		Ap	Bw	C	Ap	Bw	C	Ap	A2	BC	A1	A2	A1	A2	Bw
ANALISI FISICO-MECCANICHE															
Scheletro (>2 mm)	(g/Kg)	325	692	785	348	539	495	355	262	432	123	366	168	249	94
Sabbia molto grossa (2±1 mm)	(g/Kg)	98	137	98	176	170	162	114	133	159	98	104	118	129	91
Sabbia grossa (1±0,5 mm)	(g/Kg)	105	55	25	95	80	106	75	106	105	97	113	104	113	104
Sabbia media (0,5±0,25 mm)	(g/Kg)	130	48	30	95	65	107	90	113	116	79	79	76	138	182
Sabbia fine (0,25±0,02 mm)	(g/Kg)	475	683	760	427	569	425	531	437	504	491	489	410	369	248
Limo (0,02±0,002 mm)	(g/Kg)	78	25	45	102	55	65	85	95	60	115	102	153	138	173
Argilla (<0,002 mm)	(g/Kg)	114	53	42	105	60	135	105	115	57	120	113	139	113	201
ANALISI CHIMICHE															
pH (H ₂ O)		6,3	6,5	6,5	6,3	6,8	6,6	6,6	6,5	6,3	5,9	5,5	5,9	5,8	6,1
pH (KCl)		5,1	4,1	4,0	5,2	4,7	4,0	5,8	5,3	4,3	5,3	4,1	5,2	4,2	4,2
Calcare totale	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Calcare attivo	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Carbonio	(g/Kg)	6	3		11	5		15	2	2	50	13	69	14	3
Sostanza organica	(g/Kg)	10	5		19	8		27	4	3	86	23	118	24	6
Azoto totale	(g/Kg)	0,8	0,3		1,0	0,3		1,4	0,5	0,3	4,7	0,9	6,1	0,9	0,4
C/N		7	10		11	16		11	4	5	11	15	11	16	9
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅) corretti	(mg/Kg)	27	10		77	12		98	20	2	28	5	39	11	4
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅)	(mg/Kg)	26	10		70	13		89	19	4	26	6	37	11	5
COMPLESSO DI SCAMBIO															
Ione Calcio	(meq/100 g)	7,17	7,95		9,36	8,42		6,39	8,42	4,99	10,29	1,87	3,43	1,40	2,03
Ione Magnesio	(meq/100 g)	1,49	2,06		2,24	3,22		1,18	1,65	2,83	2,19	0,59	0,64	0,46	0,77
Ione Sodio	(meq/100 g)	0,54	0,71		0,54	0,60		0,38	0,87	0,33	0,33	0,49	0,22	0,05	0,49
Ione Potassio	(meq/100 g)	0,48	0,58		0,83	0,26		0,74	1,05	0,19	0,80	0,51	0,29	0,13	0,22
Somma basi di scambio	(meq/100 g)	9,69	11,29		12,97	12,49		8,69	11,99	8,34	13,60	3,46	4,58	2,05	3,51
C.S.C.	(meq/100 g)	12,64	13,67		14,27	13,71		16,62	17,7	18,98	22,83	15,05	33,57	15,92	16,77
G.S.B.	(%)	77	83		91	91		52	68	44	60	23	14	13	21
Acidità di scambio	(meq/100 g)	2,95	2,38		1,31	1,22		7,93	5,67	10,64	9,23	11,58	28,99	13,87	13,26

Tabella 8.9 - Schema riassuntivo dei risultati delle analisi fisico chimiche effettuate sui campioni di terreno prelevati nei profili aperti nel vigneto abbandonato

		Profilo 19			Profilo 20			Profilo 21			Profilo 22			Profilo 23			Profilo 24			Profilo 25	
Riferimento		2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248
Profilo/Orizzonte		A	Bw	C	A	Bw	C	A	Bw	C	A	Bw	C	A	Bw	C	A	Bw	C	A	Bw
ANALISI FISICO-MECCANICHE																					
Scheletro (>2 mm)	(g/Kg)	276	309	350	162	497	169	456	594	226	414	487	615	547	356	709	269	465	457	248	199
Sabbia molto grossa (2+1 mm)	(g/Kg)	118	141	138	171	307	264	96	123	173	132	146	140	92	168	111	181	116	143	155	167
Sabbia grossa (1+0,5 mm)	(g/Kg)	105	93	94	134	155	149	91	67	138	93	97	81	72	112	57	133	84	88	128	140
Sabbia media (0,5+0,25 mm)	(g/Kg)	134	119	356	160	92	147	105	66	149	107	92	63	81	117	43	154	82	80	6	136
Sabbia fine (0,25+0,02 mm)	(g/Kg)	397	421	160	318	271	305	489	602	351	491	520	627	509	468	695	384	517	495	487	366
Limo (0,02+0,002 mm)	(g/Kg)	96	69	87	95	51	33	116	66	80	77	58	32	187	67	45	82	95	78	99	109
Argilla (<0,002 mm)	(g/Kg)	150	157	165	123	124	102	103	77	110	100	86	58	59	69	50	67	106	117	125	83
ANALISI CHIMICHE																					
pH (HzO)		6,0	6,0	6,0	6,3	6,3	6,2	6,3	6,7	6,6	6,1	6,4	6,7	5,5	5,9	6,1	5,9	5,9	6,2	6,0	6,2
pH (KCl)		4,8	4,3	4,2	4,8	4,2	4,1	4,9	4,6	4,1	4,4	4,4	4,3	3,9	4,3	3,9	4,4	4,1	4,2	4,6	4,5
Calcare totale	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Calcare attivo	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Carbonio	(g/Kg)	21	9		14	9		19	12		15	10		14	16		15	18		23	19
Sostanza organica	(g/Kg)	36	16		23	15		33	20		27	17		24	28		25	31		40	34
Azoto totale	(g/Kg)	1,3	0,4		1,3	0,3		1,3	0,3		0,9	0,5		0,7	0,9		0,8	0,7		1,3	1,0
C/N		16	20		11	28		14	38		18	20		21	19		17	24		17	20
Fosfati assimilabili (P2 O5) corretti	(mg/Kg)	9	17		13	8		18	2		9	15		21	22		13	9		10	17
Fosfati assimilabili (P2 O5)	(mg/Kg)	10	17		13	9		18	3		10	15		21	21		13	9		11	16
COMPLESSO DI SCAMBIO																					
Ione Calcio	(meq/100 g)	7,95	5,77		6,39	3,12		4,68	9,04		2,81	2,18		2,03	2,03		1,56	2,65		2,81	4,83
Ione Magnesio	(meq/100 g)	1,05	2,06		1,44	2,08		1,49	3,22		0,85	0,57		0,36	0,54		0,36	0,77		0,62	1,18
Ione Sodio	(meq/100 g)	0,05	0,05		0,11	0,60		0,11	0,43		0,16	0,33		0,33	0,27		0,33	0,11		0,27	0,33
Ione Potassio	(meq/100 g)	0,19	0,06		0,22	0,13		0,35	0,22		0,16	0,16		0,10	0,13		0,32	0,22		0,22	0,45
Somma basi di scambio	(meq/100 g)	9,25	7,95		8,17	5,93		6,63	12,92		3,98	3,24		2,81	2,97		2,57	3,76		3,92	6,79
C.S.C.	(meq/100 g)	21,74	19,29		13,69	14,07		20,79	18,33		15,68	14,68		17,19	13,86		10,56	15,97		17,38	34,73
G.S.B.	(%)	43	41		60	42		32	70		25	22		16	21		24	24		23	20
Acidità di scambio	(meq/100 g)	12,48	11,34		5,52	8,14		14,16	5,42		11,70	11,45		14,38	10,90		7,99	12,21		13,46	27,94

8.1.1 Caratterizzazione pedologica dei sistemi colturali “pascolo” ed “erbaio”

I sistemi colturali “pascolo” ed “erbaio” selezionati nell’ambito dell’area di studio “Berchidda-Monti” per gli approfondimenti oggetto della presente tesi di dottorato sono ubicati in aree caratterizzate da una quota tra 284 e 305 m s.l.m., una pendenza tra 2 e 12% ed una esposizione prevalentemente sud-ovest (SW) del pascolo e nord-est (NE) dell’erbaio (tabella 8.3 e 8.4).

La profondità media dei 4 profili aperti nell’erbaio è risultata di circa 110 cm, mentre nel pascolo i 5 profili presentavano l’orizzonte C ad una profondità media di circa 140 cm.

L’analisi granulometrica condotta sui campioni di terreno prelevati dal pascolo e dall’erbaio ha messo in evidenza, coerentemente a quanto riscontrato nell’intero bacino “Berchidda-Monti”, una tessitura tendenzialmente sabbiosa (tabelle 8.10 e 8.11). In entrambi i sistemi colturali considerati, i suoli risultano caratterizzati da una reazione sub-acida e da una quantità media di carbonio organico di 20,3 e 5,8 g kg⁻¹ nell’orizzonte Ap e BW rispettivamente.

Per ciascun orizzonte relativo ad ogni profilo è stata calcolata la densità apparente. In tabella 8.12 sono riportati i risultati riferiti alla terra fine e quelli corretti sulla base del contenuto di scheletro, che è risultato molto elevato in ciascun campione.

Tabella 8.10 - Schema riassuntivo dei risultati delle analisi fisico chimiche effettuate sui campioni di terreno prelevati nei profili scavati nell'erbaio

Profilo/Orizzonte		Profilo 13		Profilo 14		Profilo 15		Profilo 16		
		A	Bw	A	Bw	A	Bw	A1	A2	BC
ANALISI FISICO-MECCANICHE										
Scheletro (>2 mm)	(g/Kg)	310	608	263	261	209	218	246	315	220
Sabbia molto grossa (2÷1 mm)	(g/Kg)	112	90	137	112	119	187	106	124	149
Sabbia grossa (1÷0,5 mm)	(g/Kg)	91	54	108	100	123	101	122	107	118
Sabbia media (0,5÷0,25 mm)	(g/Kg)	122	62	128	141	122	154	84	117	412
Sabbia fine (0,25÷0,02 mm)	(g/Kg)	418	612	343	388	372	368	422	378	66
Limo (0,02÷0,002 mm)	(g/Kg)	127	76	137	136	131	99	130	151	53
Argilla (<0,002 mm)	(g/Kg)	130	107	147	123	133	91	135	123	203
ANALISI CHIMICHE										
pH (H ₂ O)		5,3	5,4	5,5	6,0	5,0	5,3	6,0	6,1	5,6
pH (KCl)		4,0	3,8	4,3	4,1	3,8	3,9	5,2	4,2	3,7
Calcare totale	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Calcare attivo	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Carbonio	(g/Kg)	20,93	8,26	19,23	3,76	13,94	6,52	23,43	14,07	2,72
Sostanza organica	(g/Kg)	36,08	14,24	33,16	6,49	24,03	11,23	40,39	24,26	4,70
Azoto totale	(g/Kg)	1,88	0,48	2,21	0,41	2,13	0,48	2,55	1,02	0,35
C/N		11,15	17,34	8,69	9,27	6,55	13,68	9,19	13,76	7,78
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅) corretti	(mg/Kg)	50,47	18,49	48,12	9,08	52,35	9,08	112,56	23,66	3,90
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅)	(mg/Kg)	46,60	18,05	44,50	9,66	48,28	9,66	102,01	22,67	5,04
COMPLESSO DI SCAMBIO										
ione Calcio	(meq/100 g)	3,12	1,09	2,50	1,40	1,56	2,03	7,49	1,56	2,03
ione Magnesio	(meq/100 g)	1,05	0,28	0,64	0,39	0,31	0,49	1,77	0,64	1,16
ione Sodio	(meq/100 g)	0,22	0,22	0,27	0,38	0,16	0,16	0,16	0,16	0,49
ione Potassio	(meq/100 g)	0,42	0,42	0,45	0,29	0,35	0,32	0,64	0,29	0,22
Somma basi di scambio	(meq/100 g)	4,81	2,01	3,86	2,46	2,38	3,00	10,06	2,65	3,90
C.S.C.	(meq/100 g)	18,40	13,83	20,96	11,11	17,25	9,21	12,12	12,02	15,73
G.S.B.	(%)	26	15	18	22	14	33	83	22	25
Acidità di scambio	(meq/100 g)	13,59	11,82	17,10	8,65	14,87	6,22	2,06	9,37	11,83

Tabella 8.11 - Schema riassuntivo dei risultati delle analisi fisico chimiche effettuate sui campioni di terreno prelevati nei profili scavati nel pascolo

Profilo/Orizzonte		Profilo 8		Profilo 9		Profilo 10			Profilo 11		Profilo 12	
		Ap	Bw	A	Bw	A	Bw	BC	Ap	Bw	Ap	BC
ANALISI FISICO-MECCANICHE												
Scheletro (>2 mm)	(g/Kg)	355	524	317	261	334	279	437	245	447	354	648
Sabbia molto grossa (2÷1 mm)	(g/Kg)	132	115	118	121	128	132	118	118	97	114	140
Sabbia grossa (1÷0,5 mm)	(g/Kg)	101	72	104	104	95	128	87	105	75	101	52
Sabbia media (0,5÷0,25 mm)	(g/Kg)	102	68	102	125	107	119	105	130	102	116	39
Sabbia fine (0,25÷0,02 mm)	(g/Kg)	401	543	324	392	413	350	526	383	487	407	645
Limo (0,02÷0,002 mm)	(g/Kg)	136	109	229	146	133	144	56	133	123	144	18
Argilla (<0,002 mm)	(g/Kg)	128	94	123	113	123	128	109	131	116	118	106
ANALISI CHIMICHE												
pH (H ₂ O)		5,4	5,9	5,7	6,3	6,0	6,4	6,3	5,6	6,4	6,1	6,2
pH (KCl)		4,0	4,1	4,4	4,3	4,8	4,4	4,1	4,0	4,2	3,9	4,1
Calcare totale	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Calcare attivo	(g/Kg)	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente	Assente
Carbonio	(g/Kg)	25,43	6,57	19,01	5,55	30,8	7,64	5,45	15,19	2,55	14,95	5,43
Sostanza organica	(g/Kg)	43,84	11,33	32,77	9,56	53,2	13,17	9,39	26,19	4,40	25,77	9,36
Azoto totale	(g/Kg)	1,40	0,28	1,23	0,39	2,5	0,46	0,39	1,12	0,29	1,18	0,21
C/N		18,16	23,46	15,18	13,88	13,6	16,54	13,89	13,56	8,68	12,70	25,84
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅) corretti	(mg/Kg)	92,33	4,37	59,72	6,88	65,3	10,65	28,36	32,60	4,37	28,83	24,60
Fosfati assimilabili (P ₂ O ₅)	(mg/Kg)	83,96	5,46	54,85	7,70	59,8	11,05	26,87	30,64	5,46	27,29	23,51
COMPLESSO DI SCAMBIO												
Ione Calcio	(meq/100 g)	6,39	8,11	3,69	1,92	5,07	1,56	1,56	1,09	3,12	3,59	3,27
Ione Magnesio	(meq/100 g)	0,85	1,36	0,75	0,79	1,30	0,70	1,59	0,21	1,29	0,93	1,54
Ione Sodio	(meq/100 g)	0,43	0,98	0,33	0,38	0,35	0,27	0,60	0,22	0,27	0,11	0,22
Ione Potassio	(meq/100 g)	0,80	0,80	0,32	0,39	0,72	0,49	0,22	0,22	0,29	0,35	0,22
Somma basi di scambio	(meq/100 g)	8,48	11,25	5,09	3,49	7,44	3,02	3,98	1,74	4,96	4,97	5,26
C. S. C.	(meq/100 g)	15,60	12,78	14,28	11,04	20,64	12,08	13,24	16,59	17,98	17,02	11,75
G. S. B.	(%)	54	88	39	33	35	25	30	10	28	29	45
Acidità di scambio	(meq/100 g)	7,13	1,53	9,19	7,55	13,20	9,05	9,27	14,85	13,02	12,05	6,49

Tabella 8.12 - Valori di densità apparente originali e corretti

Uso Suolo	Profilo	Orizzonte	Densità apparente (g/cm ³)	Densità apparente campione senza scheletro (g/cm ³)
pascolo	8	A	1,45	1,19
pascolo	8	Bw	1,74	1,48
pascolo	9	A	1,34	1,11
pascolo	9	Bw	1,86	1,74
pascolo	10	A	1,57	1,46
pascolo	10	Bw	1,85	1,77
pascolo	10	BC	1,68	1,38
pascolo	11	A	1,5	1,34
pascolo	11	Bw	1,72	1,31
pascolo	12	Ap	1,62	1,49
pascolo	12	Bw	1,83	1,56
erbaio	13	A	1,57	1,41
erbaio	13	Bw	1,7	1,38
erbaio	14	A	1,3	1,15
erbaio	14	Bw	1,78	1,67
erbaio	15	A	1,49	1,26
erbaio	15	Bw	1,64	1,32
erbaio	16	A1	1,33	1,18
erbaio	16	A2	1,65	1,52

I dati di concentrazione di carbonio organico e di densità apparente derivanti dai 125 campioni di suolo prelevati nel pascolo e nell'erbaio durante la primavera del 2008 sono stati raggruppati in funzione della posizione del campione (sotto chioma o fuori chioma) nell'area di campionamento e della profondità di prelievo (0-10, 10-20, 20-30, 30-40).

Nelle figure 8.1 e 8.2 relative al sistema "pascolo" si evidenzia che nelle aree "sotto chioma" la densità apparente e la concentrazione di carbonio organico presentano un andamento tipico, ovvero la densità apparente aumenta con la profondità, mentre la concentrazione di carbonio organico decresce secondo una funzione di tipo esponenziale con l'aumento della profondità. L'effetto residuo delle lavorazioni che vengono effettuate ogni quattro anni nelle aree fuori chioma sembra quindi tuttora visibile. Nelle aree di saggio "fuori chioma" la densità apparente si mantiene pressoché costante all'aumentare della profondità mentre la

concentrazione di carbonio organico ha un andamento non modellabile mediante funzione esponenziale;

l'effetto residuo delle lavorazioni che vengono effettuate ogni quattro/cinque anni nelle aree fuori chioma risulta tuttora visibile. Per quanto riguarda le variabili topografiche di pendenza ed esposizione, alla scala di osservazione non è stata riscontrata alcuna influenza significativa di tali variabili sul contenuto di carbonio organico del suolo nel sistema "pascolo".

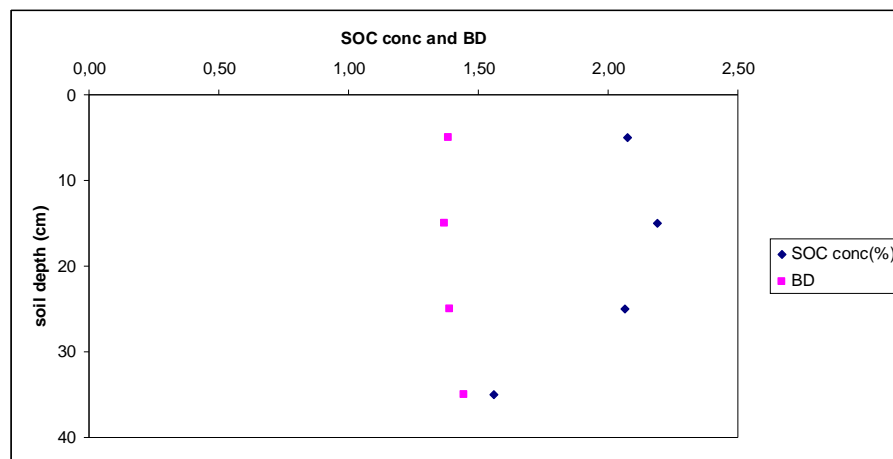


Figura 8.1 - Pascolo: andamento della concentrazione media del carbonio organico e della densità apparente in relazione alla profondità nelle aree di saggio "fuori chioma"

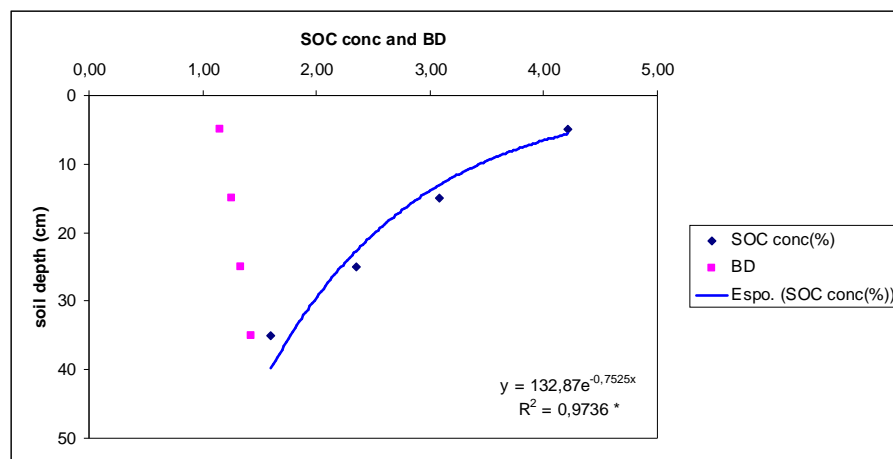


Figura 8.2 - Pascolo: andamento della concentrazione media del carbonio organico modellato mediante funzione esponenziale ed andamento della densità apparente in relazione alla profondità nelle aree di saggio "sotto chioma"

Per quanto riguarda l'erbaio (figura 8.3 e 8.4), l'effetto di rimescolamento del suolo dovuto alle lavorazioni è ben visibile, in maniera più marcata nelle aree "fuori chioma". Anche in questo caso non è stata riscontrata alcuna influenza significativa delle variabili pendenza ed esposizione sul contenuto di carbonio organico del suolo. Probabilmente l'influenza di tali variabili si rende visibile ad una scala di osservazione maggiore.

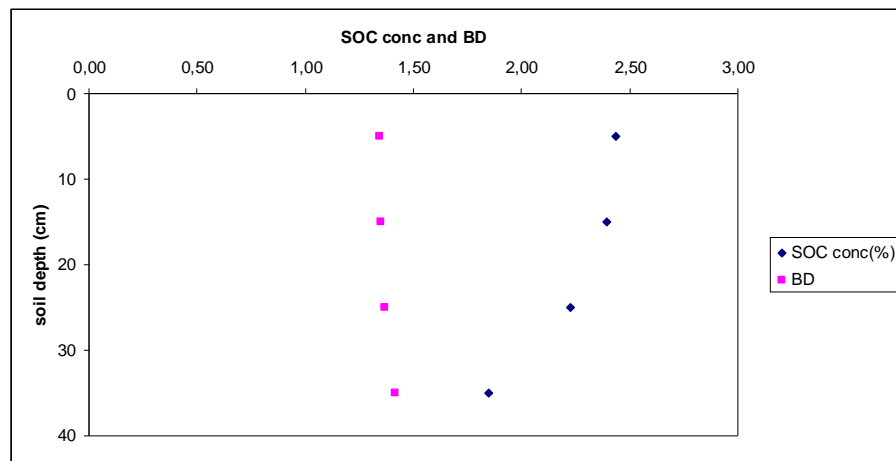


Figura 8.3 - Erbaio: andamento della concentrazione media del carbonio organico e della densità apparente in relazione alla profondità nelle aree di saggio "fuori chioma"

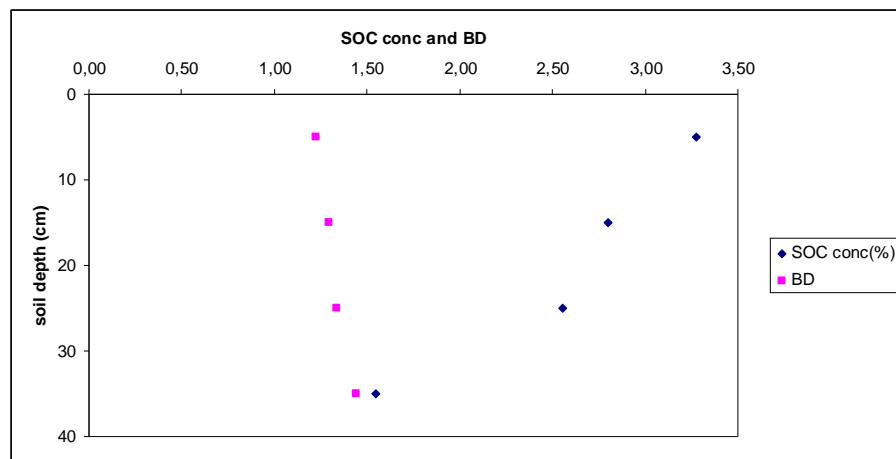


Figura 8.4 - Erbaio: andamento della concentrazione media del carbonio organico e della densità apparente in relazione alla profondità nelle aree di saggio "sotto chioma"

8.2 ANALISI STATISTICA

8.2.1 Pascolo

Di seguito (tabella 8.13) vengono riassunti i risultati dell'analisi statistica classica descrittiva effettuata sullo stock di carbonio organico (espresso come grammi di C contenuti nei primi 40 cm profondità del suolo) e sulla densità apparente del terreno (BD).

Tabella 8.13- Statistiche descrittive delle variabili SOC e BD dei campioni provenienti dal pascolo

	stock C (g)	BD (g/cm ³)
Media	29.27	1,39
Errore standard	1,43	0,01
Mediana	30,69	1,39
Moda	n.d.	1,37
Deviazione standard	9,03	0,08
Varianza campionaria	81.62	0,01
Curtosi	1,05	1,86
Asimmetria	0,29	-0,66
Intervallo	45,45	0,39
Minimo	10,26	1,14
Massimo	55,71	1,53
Somma	1170,97	55,64
Conteggio	40	40

La varianza campionaria della densità apparente è molto bassa, ciò può essere dovuto al tipo di gestione colturale operata nei pascoli dell'area di studio; tale sistema di gestione prevede infatti che a cadenza quadriennale il pascolo venga sottoposto ad aratura e semina, al fine di garantire una buona ricostituzione della cotica erbosa. L'effetto di rimescolamento del suolo derivante dalla lavorazione esercita una significativa influenza sulla densità apparente anche a distanza di qualche anno.

In figura 8.5 sono riportati il diagramma a dispersione la matrice di correlazione tra SOC e BD, i quali mettono in evidenza l'elevata correlazione inversa esistente tra le due variabili.

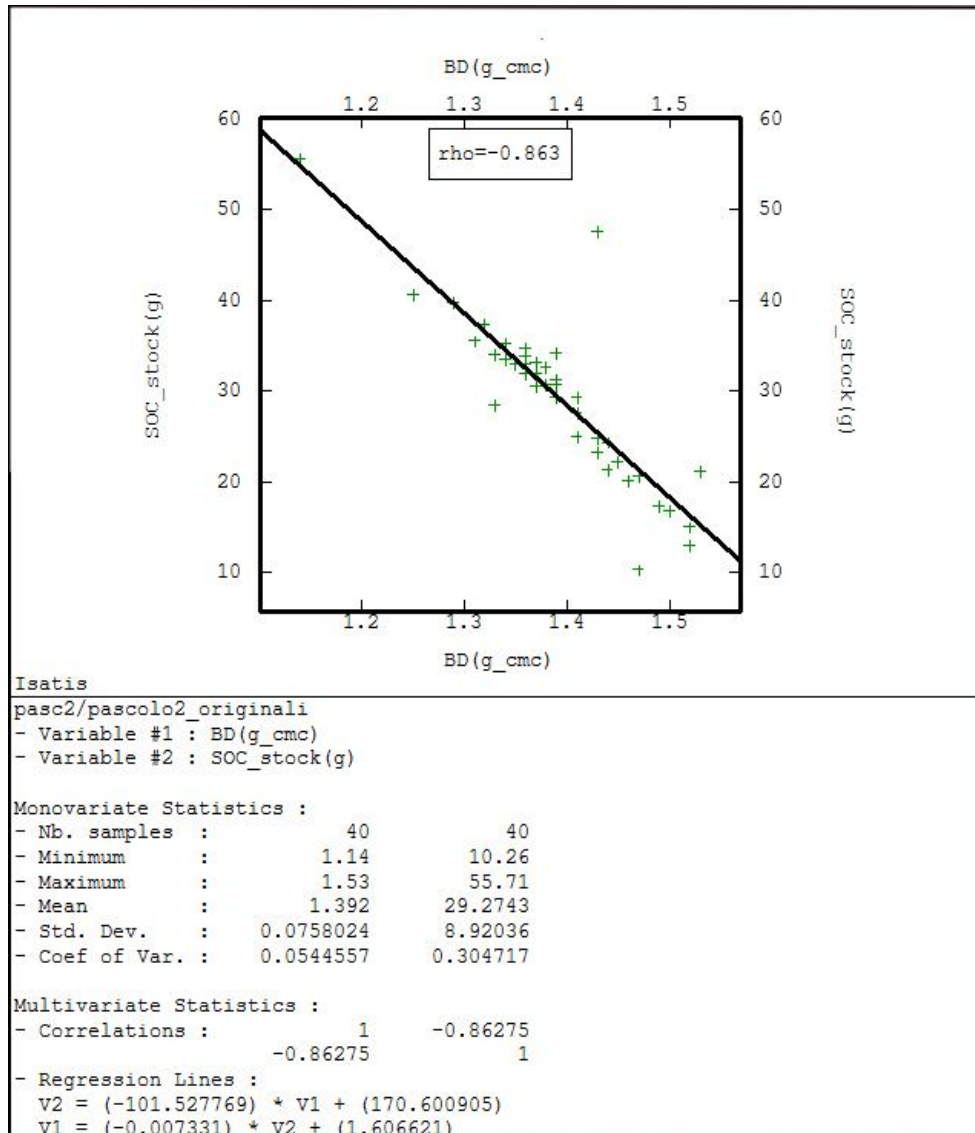


Figura 8.5 - Diagramma a dispersione e matrice di correlazione relativi alle variabili SOC e BD. Dati relativi al pascolo

8.2.2 Erbaio autunno-vernino

In tabella 8.14 vengono riportati i risultati dell'analisi statistica descrittiva classica effettuata sullo stock di carbonio organico (espresso come grammi di C contenuti nei primi 40 cm profondità del suolo) e sulla densità apparente del terreno (BD).

Tabella 8.14: statistiche descrittive delle variabili SOC e BD dei campioni provenienti dall'erbaio

	stock C (g)	BD (g/cm ³)
Media	29,52	1,36
Errore standard	0,67	0,01
Mediana	29,63	1,38
Moda	n.d.	1,42
Deviazione standard	6,18	0,08
Varianza campionaria	38,22	0,01
Curtosi	0,63	3,54
Asimmetria	-0,42	-1,26
Intervallo	31,29	0,50
Minimo	9,59	1,03
Massimo	40,88	1,53
Somma	2509,17	115,55
Conteggio	85	85

Analogamente a quanto osservato per il pascolo, la varianza campionaria della densità apparente è molto bassa, mentre quella relativa alla concentrazione di carbonio organico è inferiore rispetto a quella relativa ai campioni prelevati dal pascolo. La bassa variabilità dei dati può essere dovuta all'effetto di omogeneizzazione derivante dalle frequenti lavorazioni, che nella superficie a più frequente destinazione come erbaio vengono eseguite per consentire la preparazione del letto di semina.

In figura 8.6 sono riportati il diagramma a dispersione e la matrice di correlazione relativi alle variabili SOC e BD; si può osservare l'elevata correlazione inversa esistente tra le due variabili in accordo alle osservazioni effettuate per il pascolo.

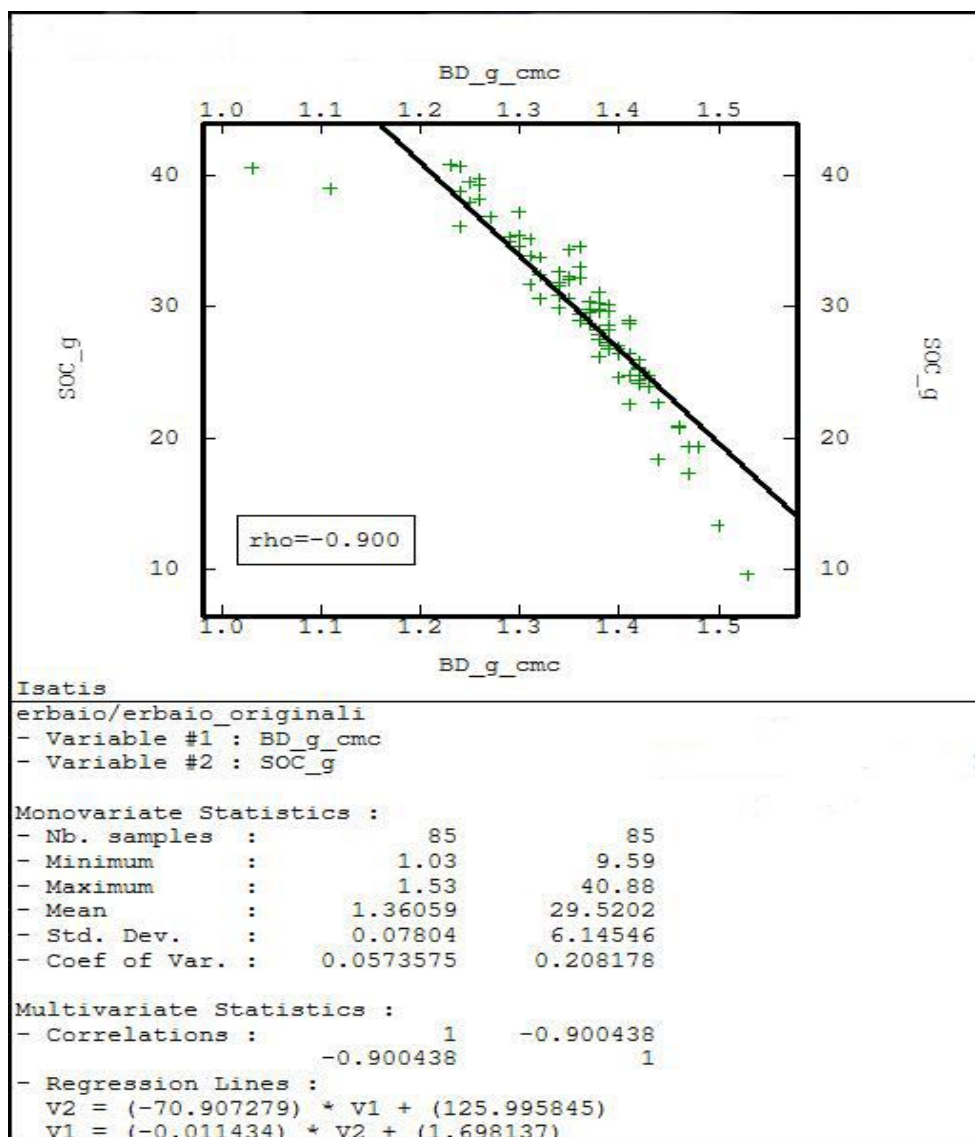


Figura 8.6 - Diagramma a dispersione e matrice di correlazione relativi alle variabili SOC e BD. Dati riferiti all'erbaio

8.3 CONFRONTO TRA PASCOLO ED ERBAIO

In tabella 8.15 sono riportati gli stock di carbonio organico medi del pascolo e dell'erbaio per ogni intervallo di profondità campionato e per l'intero profilo:

Tabella 8.15 - Stock di carbonio medio ed errore standard della media in pascolo ed erbaio. Dati derivanti dai campioni di suolo

Profondità (cm)	SOC stocks (t ha ⁻¹)			
	Pascolo		Erbaio	
	media	SE	media	SE
0 – 10	25.45	0.49	25.47	0.21
10 – 20	25.27	0.38	24.60	0.19
20 – 30	23.31	0.35	23.08	0.22
30 – 40	18.05	0.41	19.34	0.24
media 0 – 40	29.27	1.43	29,52	0.67

L'errore standard della media mette in evidenza la maggiore omogeneità dello stock di carbonio organico nell'erbaio; questo è attribuibile all'effetto delle frequenti lavorazioni del terreno, che vengono condotte a cadenza annuale.

Dai risultati emerge, in entrambe le aree di studio, una discontinuità fra gli intervalli di profondità 30 – 40 cm e gli intervalli individuati fra 0 e 30 cm di profondità (figura 8.7). Tale discontinuità è chiaramente attribuibile all'effetto delle lavorazioni (profondità massima 30 cm) condotte in occasione dell'impianto dell'erbaio autunno-vernino in entrambe le aree di studio.

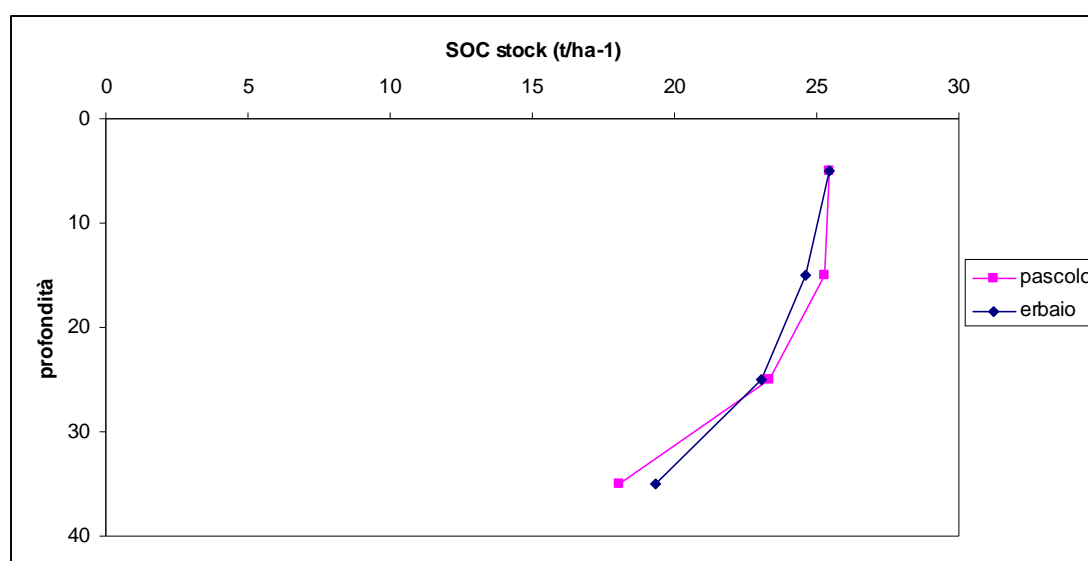


Figura 8.7: Andamento dello stock di carbonio medio per intervallo di profondità campionato

Nelle tabelle da 8.16 a 8.20 sono riportate le medie ed i risultati dell'analisi della varianza condotta per lo stock di carbonio organico (SOC stock) rispettivamente per gli intervalli 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e medio (0-40 cm).

Per tutti gli intervalli considerati non sono emerse delle differenze statisticamente significative fra usi suolo mentre, per quanto riguarda la copertura vegetale, il sottochioma ha mostrato un SOC stock più elevato rispetto al fuori chioma per gli intervalli 0-10, 10-20, 20-30 ed in totale. Solo relativamente all'intervallo 30-40 cm non sono state poste in evidenza delle differenze statisticamente significative fra usi suolo per il SOC stock.

Tabella 8.16 – Medie e risultati dell'analisi della varianza relativi al SOC stock (g) per l'intervallo 0-10 cm

	Fuori chioma	Sotto chioma	Media
Pascolo	7,38	12,70	8,18 a
Erbaio	7,85	10,45	8,19 a
Media	7,71 b	11,25 a	

Le medie seguite dalla stessa lettera non sono significativamente diverse per $P \leq 0,05$.

Tabella 8.17 – Medie e risultati dell'analisi della varianza relativi al SOC stock (g) per l'intervallo 10-20 cm

	Fuori chioma	Sotto chioma	Media
Pascolo	7,69	10,61	8,11 a
Erbaio	7,69	9,32	7,91 a
Media	7,69 b	9,78 a	

Le medie seguite dalla stessa lettera non sono significativamente diverse per $P \leq 0,05$.

Tabella 8.18 – Medie e risultati dell'analisi della varianza relativi al SOC stock (g) per l'intervallo 20-30 cm

	Fuori chioma	Sotto chioma	Media
Pascolo	7,32	8,45	7,50 a
Erbaio	7,23	8,71	7,43 a
Media	7,26 b	8,61 a	

Le medie seguite dalla stessa lettera non sono significativamente diverse per $P \leq 0,05$.

Tabella 8.19 – Medie e risultati dell'analisi della varianza relativi al SOC stock (g) per l'intervallo 30-40 cm

	Fuori chioma	Sotto chioma	Media
Pascolo	5,73	6,19	5,80 a
Erbaio	6,23	6,08	6,22 a
Media	6,08 a	6,12 a	

Le medie seguite dalla stessa lettera non sono significativamente diverse per $P \leq 0,05$.

Tabella 8.20 – Medie e risultati dell'analisi della varianza relativi al SOC stock (g) per l'intervallo 0-40 cm

	Fuori chioma	Sotto chioma	Media
Pascolo	27,74	37,95	29,27 a
Erbaio	28,94	33,46	29,52 a
Media	28,56 b	35,04 a	

Le medie seguite dalla stessa lettera non sono significativamente diverse per $P \leq 0,05$.

8.3.1 Correlazione tra variabili

In tabella 8.21 è riportata la matrice di correlazione fra le variabili SOC stock 0-10 cm, SOC stock 10-20 cm, SOC stock 20-30 cm, SOC stock 30-40 cm, SOC stock medio per l'intervallo 0-40 cm, esposizione e pendenza. Queste ultime due variabili, espresse in gradi, sono state sottoposte all'analisi statistica previa loro trasformazione angolare.

Il contenuto di sostanza organica dell'intervallo alla minore profondità (0-10 cm) influenza in modo decrescente il contenuto di sostanza organica degli intervalli a maggiori profondità.

Lo stock di carbonio organico medio dell'intervallo 0-40 cm è strettamente correlato al SOC stock degli altri intervalli considerati; fra questi, l'intervallo 20-30 cm mostra il più elevato coefficiente di correlazione, 0.84. Il contenuto di SOC in tale intervallo sembra pertanto avere un peso leggermente più elevato nella determinazione dello stock di carbonio totale del profilo.

Nessuna correlazione significativa è stata osservata fra stock di carbonio organico e pendenza ed esposizione, probabilmente in relazione alla limitata variazione di queste due variabili derivante dalla ridotta scala spaziale studiata.

Tabella 8.21 - Matrice di correlazione tra le variabili considerate

	SOC 0-10 cm (g)	SOC 10-20 cm (g)	SOC 20-30 cm (g)	SOC 30-40 cm (g)	SOC 0-40 cm (g)	Esposizione	Pendenza
SOC 0-10 cm (g)	1,00	0,64*	0,52*	0,47*	0,81*	0,07	-0,04
SOC 10-20 cm (g)	0,64*	1,00	0,61*	0,51*	0,83*	0,09	-0,12
SOC 20-30 cm (g)	0,52*	0,61*	1,00	0,66*	0,84*	0,01	0,05
SOC 30-40 cm (g)	0,47*	0,51*	0,66*	1,00	0,82*	0,02	0,04
SOC 0-40 cm (g)	0,81*	0,83*	0,84*	0,82*	1,00	0,06	-0,05
Esposizione	0,07	0,09	0,01	0,02	0,06	1,00	-0,19
Pendenza	-0,04	-0,12	-0,05	0,04	-0,05	-0,19	1,00

Il dato seguito da * indica un r significativo allo 0,01.

8.4 RISULTATI DELL'ANALISI GEOSTATISTICA

8.4.1 Stima dello stock di carbonio organico nel pascolo

In figura 8.8 è riportata la mappa del variogramma relativa alla variabile stock di carbonio organico del suolo (SOCstock).

La mappa del variogramma è un grafico che si costruisce ponendo un'origine comune per ogni punto campionato; le distanze vettoriali h tra un punto e tutti gli altri vengono raggruppate secondo il modulo vettoriale (lunghezza del vettore e quindi distanza) e secondo l'orientamento del vettore stesso. Per ogni coppia di punti aventi distanza ed orientamento simile viene calcolata la semidifferenza quadrata dai valori nei due punti separati dal vettore h ; a questo punto viene calcolata la media di tutte le semivarianze per ottenere il valore della semivarianza media della cella in cui ricadono le teste dei vettori, ovvero il valore del semivariogramma sperimentale relativo a tutti i vettori simili. Per la costruzione della mappa del variogramma possono essere utilizzate celle (*bin*) rettangolari o quadrate oppure celle a settori circolari; l'ampiezza delle celle è determinata dall'ampiezza del lag, che rappresenta la linea (vettore h), che separa due punti qualsiasi. Il lag è definito da una lunghezza "*lag distance*" e da una direzione.

La mappa del variogramma consente di individuare la presenza di eventuali anisotropie e decidere su quali direzioni principali costruire i semivariogrammi sperimentali. Nella mappa del variogramma ogni cella viene rappresentata con un colore variabile a seconda del valore della semivarianza; in figura 8.8 i colori vicini al blu indicano bassi valori di semivarianza ed i valori vicino al rosso indicano alti valori di semivarianza. Si può osservare una anisotropia in direzione N50° (celle nei toni del blu) che indica che la variazione spaziale non è la stessa in tutte le direzioni dello spazio. La direzione N50° rappresenta la direzione di massima continuità, ossia la direzione nella quale l'autocorrelazione tra i campioni è maggiore, ovvero i campioni sono più simili.

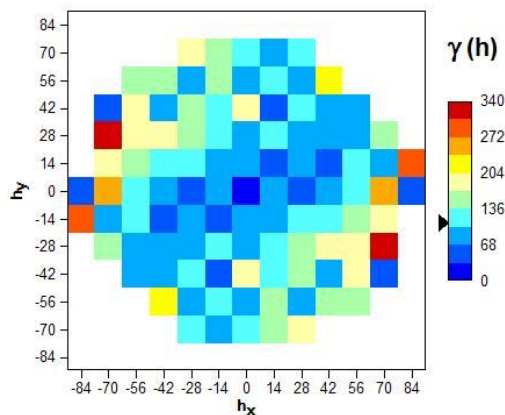


Figura 8.8 - Mappa del variogramma della variabile SOCstock relativa al pascolo

In figura 8.9 sono riportati i semivariogrammi sperimentali per le due direzioni principali di anisotropia (N50° e N140°) ed il modello a loro adattato della variabile SOCstock. I dati appaiono strutturati, segno dell'esistenza di una relazione spaziale tra i valori misurati nei diversi siti campionati, che può essere osservata alla scala del campionamento effettuato. Il semivariogramma relativo alla direzione N50° presenta un tasso di crescita inferiore rispetto a quello per la direzione N140°; il tasso di crescita del semivariogramma riflette il tasso con cui l'influenza di un campione decresce con la distanza, perciò nella direzione N50° esiste una maggiore autocorrelazione tra i campioni. I differenti range dei semivariogrammi indicano il tasso di variazione dei campioni nelle due direzioni; per osservare la stessa quantità di variazione nelle due direzioni è necessario percorrere una distanza maggiore in direzione N50°. Questo ha un'importanza considerevole nella determinazione dell'intervallo di campionamento di un'eventuale futura nuova campagna di rilievi; infatti, se i valori dello stock di carbonio sono considerati rappresentativi della popolazione, è possibile definire la variabilità spaziale della variabile regionalizzata tramite l'ellissoide di anisotropia e quindi la spaziatura ottimale tra i campioni rispetterà il rapporto di anisotropia, consentendo un notevole risparmio in termini di costi ed energie.

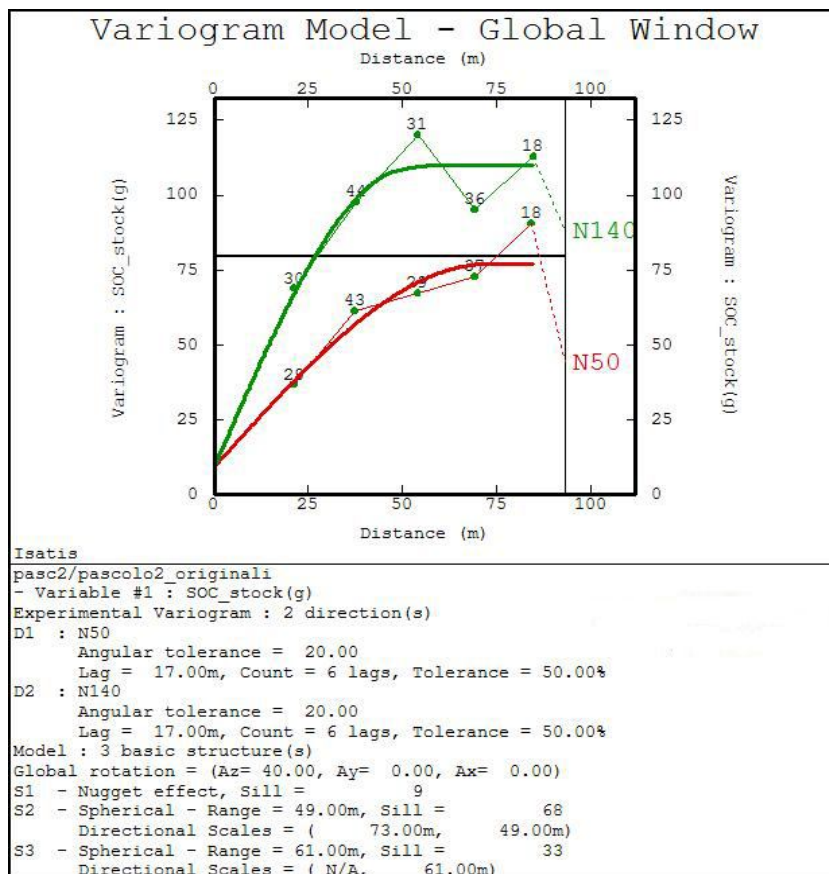


Figura 8.9 -Semivariogramma della variabile SOCstock e modello ad esso adattato comprendente un effetto nugget e due strutture sferiche. Dati relativi al pascolo

Di seguito si riportano i risultati della validazione incrociata effettuata sul modello del variogramma adattato alla variabile SOCstock.

La validazione incrociata è un metodo utilizzato per verificare la compatibilità tra un set di dati ed il loro modello strutturale. Ogni campione viene estratto a turno e si assume come dato mancante; la variabile target z nella localizzazione campionata viene momentaneamente scartata, ed in quella localizzazione ora priva di campioni viene calcolata una stima z^* usando le informazioni sui vicini (cioè l'intorno di ricerca ed il numero minimo e massimo di campioni da includere nel calcolo) ed il modello da testare. Per ogni dato mancante si ha così:

- Il valore vero;
- Il valore stimato;
- La varianza della stima.

I valori stimati tramite kriging ed i valori reali vengono paragonati attraverso le seguenti quantità medie:

- Errore medio (ME) e varianza dell'errore (VE), rispettivamente espressi da:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z^*(x_i) - z(x_i)\}$$

$$VE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z^*(x_i) - z(x_i)\}^2$$

- Errore medio standardizzato (MSE) e varianza dell'errore medio standardizzato (VSE), rispettivamente espressi da:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\{z^*(x_i) - z(x_i)\}}{\sigma^2(x_i)}$$

$$VSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\{z^*(x_i) - z(x_i)\}^2}{\sigma^2(x_i)}$$

Le due medie, quella dell'errore e quella dell'errore standardizzato, misurano il grado di correttezza (*degree of unbiasedness*) mentre la varianza dell'errore standardizzato corrisponde al rapporto tra le varianze sperimentali e quelle teoriche.

Una caratteristica interessante di tale procedura di validazione è rappresentata dai risultati in output che vengono calcolati sia considerando il dataset completo che escludendo i campioni per i quali l'errore standardizzato della cross validazione eccede una certa soglia, cioè gli outliers che giacciono fuori dai corrispondenti limiti di confidenza di una distribuzione normale. I dati per i quali l'errore standardizzato della validazione incrociata è contenuto all'interno di questa soglia vengono detti "robusti".

L'algoritmo di stima kriging risulta essere molto influenzato dai parametri del modello di semivariogramma scelto; la validazione incrociata consente di

paragonare l'effetto dei diversi modelli sui risultati dell'interpolazione tramite kriging.

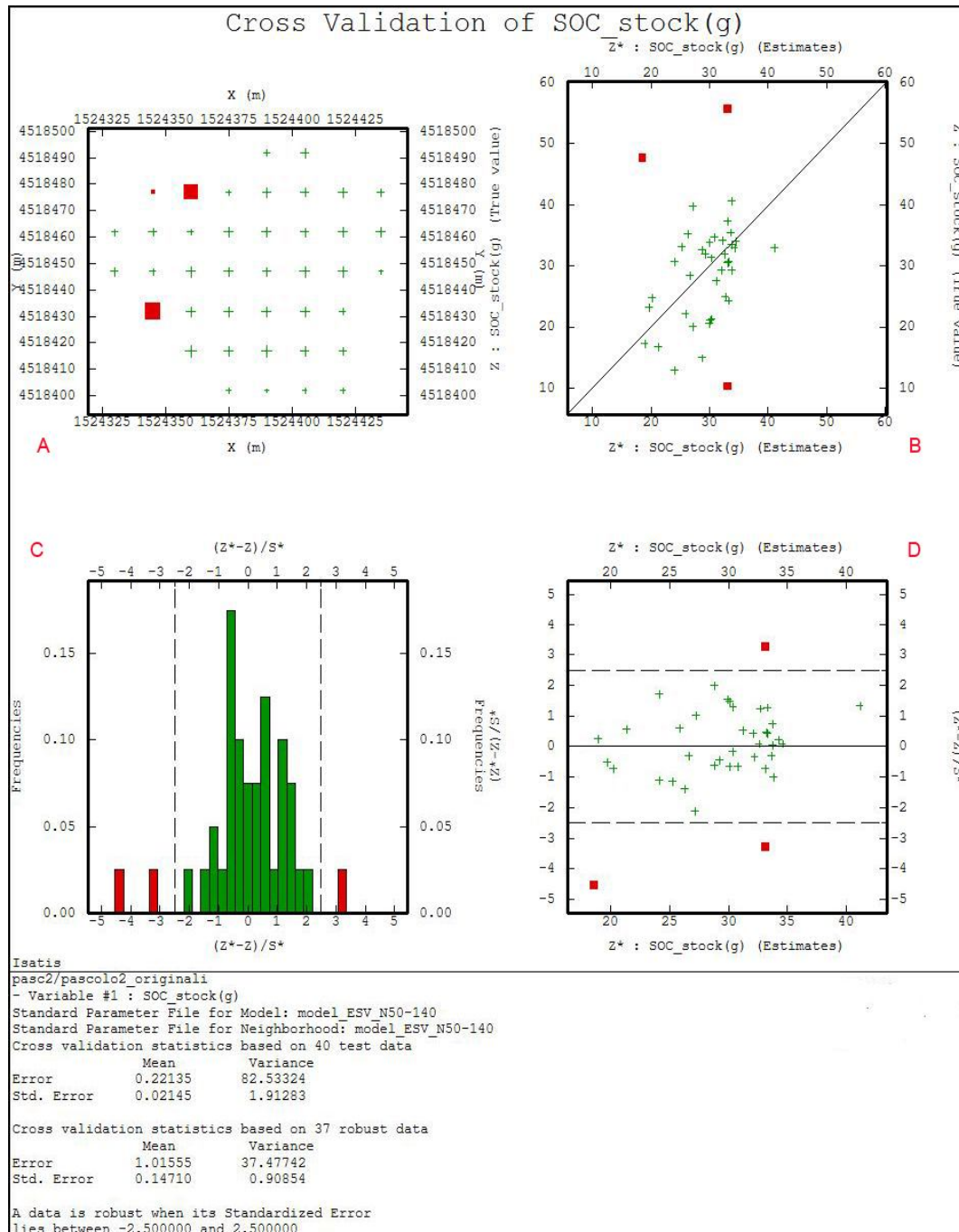


Figura 8.10 - Risultati della validazione incrociata per il modello del variogramma della variabile SOCstock nel pascolo

In figura 8.10 sono rappresentati i risultati grafici della procedura di validazione incrociata per il modello del semivariogramma della variabile SOCstock nel

pascolo; in figura 8.10 A viene restituita la mappa dei dati mediante uno scatter-plot avente la simbologia proporzionata al valore della variabile SOCstock, con l'indicazione degli outliers (quadrati rossi) e dei dati robusti (croci verdi); questi ultimi compongono circa il 96% della distribuzione di probabilità normale (soglia $\pm 2,5$).

In figura 8.10 B è riportato lo scatter-plot dei valori misurati contro quelli stimati; la nuvola di punti risulta abbastanza allineata sulla retta a 45°: punti lontani dalla retta indicano valori che sono stati stimati non correttamente.

L'istogramma degli errori standardizzati della stima (Fig. 8.10 C) fornisce una rappresentazione grafica della qualità della stima; in linea generale si può affermare che tanto più esso tende a mostrare una forma gaussiana quanto migliore è da considerare la stima. Inoltre, questo istogramma aiuta a localizzare gli outliers che cadono al di fuori delle linee verticali corrispondenti al valore di soglia della distribuzione di probabilità normale. L'istogramma degli errori riportato in figura 8.10 C pone in chiara evidenza l'esistenza di outliers e mostra inoltre una tendenza al comportamento gaussiano pur con qualche imperfezione relativa alle classi centrali.

Infine, lo scatter-plot in figura 8.10 D mostra gli errori standardizzati della stima contro i valori stimati, unitamente al valore soglia, applicato sull'errore standardizzato della stima (linee tratteggiate orizzontali).

La stima della variabile SOCstock nel pascolo è stata ottenuta tramite ordinary kriging (OK). La soluzione del sistema di equazioni che sta alla base dell'OK fornisce i pesi da assegnare alla formula dello stimatore espresso dall'equazione 3.1 descritta nel capitolo 3; i campioni più vicini al punto da stimare assumono i pesi più elevati.

In figura 8.11 viene riportata la mappa della stima della variabile SOCstock nel pascolo e in figura 8.12 è mostrata la relativa varianza della stima, dalla quale si evince come la stima sia poco affidabile ai bordi dell'area di studio.

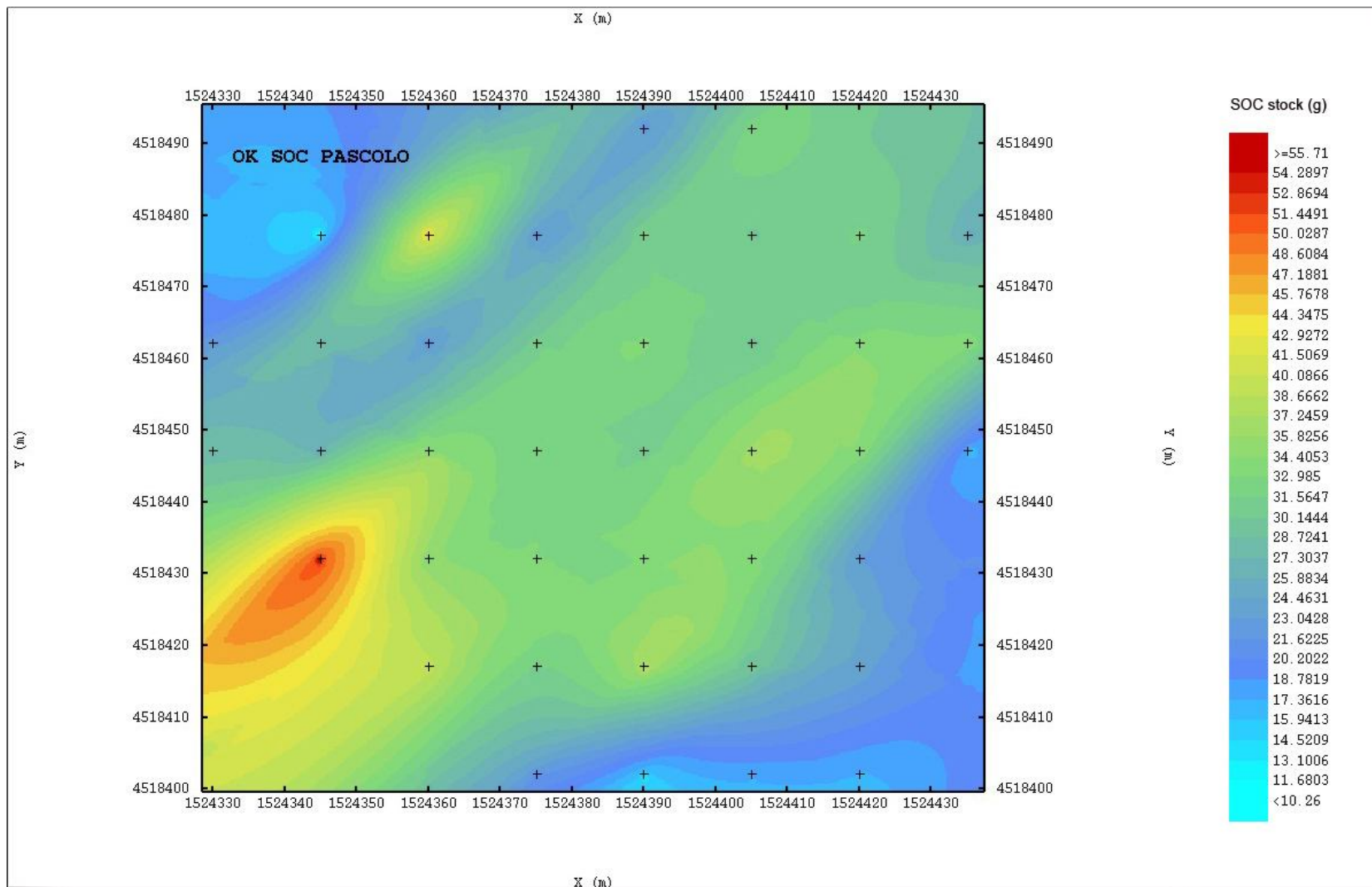


Figura 8.11 - Stima della distribuzione spaziale del carbonio organico nel pascolo ottenuta mediante ordinary kriging

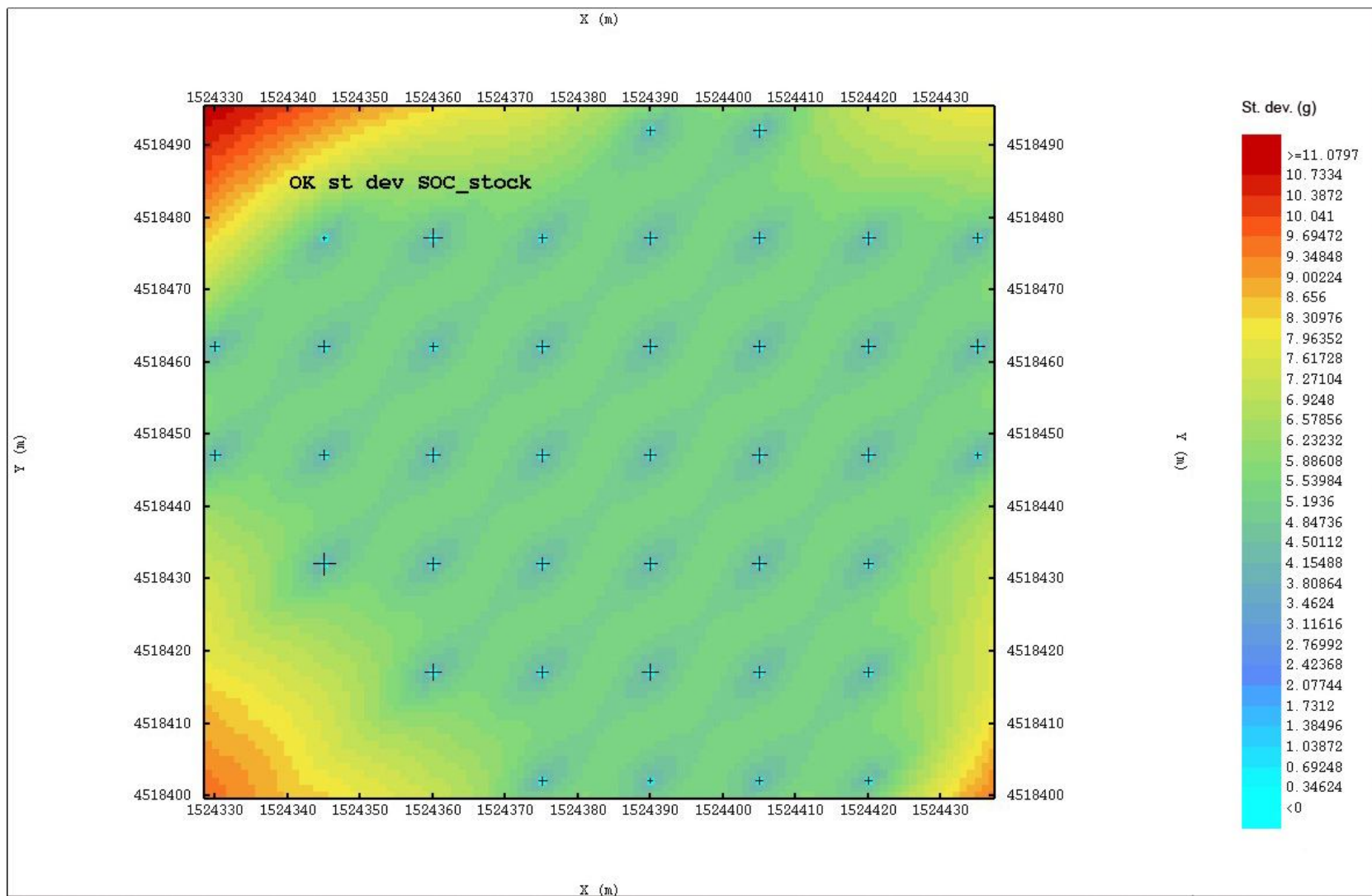


Figura 8.12 - Varianza della stima della variabile SOCstock nel pascolo

8.4.2 Stima dello stock di carbonio organico nell'erbaio

In figura 8.13 è riportata la mappa del variogramma relativa alla variabile stock di carbonio organico del suolo (SOCstock).

Si può osservare una anisotropia in direzione N30° (celle nei toni dell'azzurro) che rappresenta la direzione di massima continuità, ossia la direzione nella quale l'autocorrelazione tra i campioni è maggiore, e quindi i campioni sono più simili.

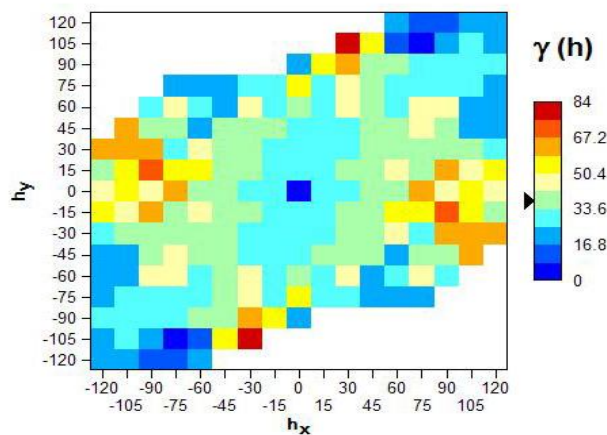


Figura 8.13 - Mappa del variogramma della variabile SOCstock nell'erbaio

In figura 8.14 sono riportati i semivariogrammi sperimentali nelle due direzioni principali di anisotropia (N30° e N120°) ed il modello a loro adattato della variabile SOCstock. I dati appaiono strutturati, segno dell'esistenza di una relazione spaziale tra i valori misurati nei diversi siti campionati, che può essere osservata alla scala del campionamento effettuato.

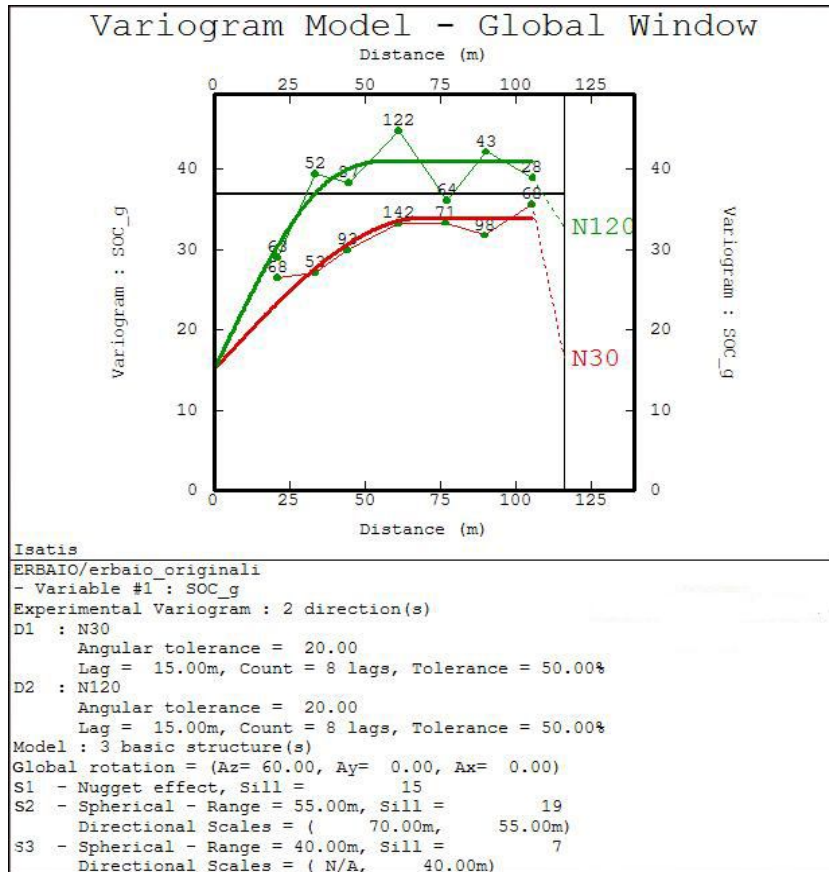


Figura 8.14 - Semivariogramma della variabile SOCstock e modello ad esso adattato comprendente un effetto nugget e due strutture sferiche. Dati riferiti all'erbaio

In figura 8.15 sono riportati i risultati della procedura di validazione incrociata per il modello dell'ESV della variabile SOCstock nell'erbaio; in figura 8.15 A viene restituita la mappa dei dati mediante uno scatter-plot avente la simbologia proporzionata al valore della variabile SOCstock, con l'indicazione dei 4 outliers (quadrati rossi). In figura 8.15 B è riportato lo scatter-plot dei valori misurati contro quelli stimati; la nuvola di punti risulta abbastanza allineata sulla retta a 45°. L'istogramma degli errori standardizzati della stima (Fig. 8.15 C) indica la buona qualità della stima; esso infatti mostra una forma tendenzialmente gaussiana e marcatamente più assimilabile ad una curva normale rispetto a quanto osservato per il pascolo..

Infine, lo scatter-plot di figura 8.15 D mostra gli errori standardizzati della stima contro i valori stimati, unitamente al valore soglia, applicato sull'errore standardizzato della stima (linee tratteggiate orizzontali).

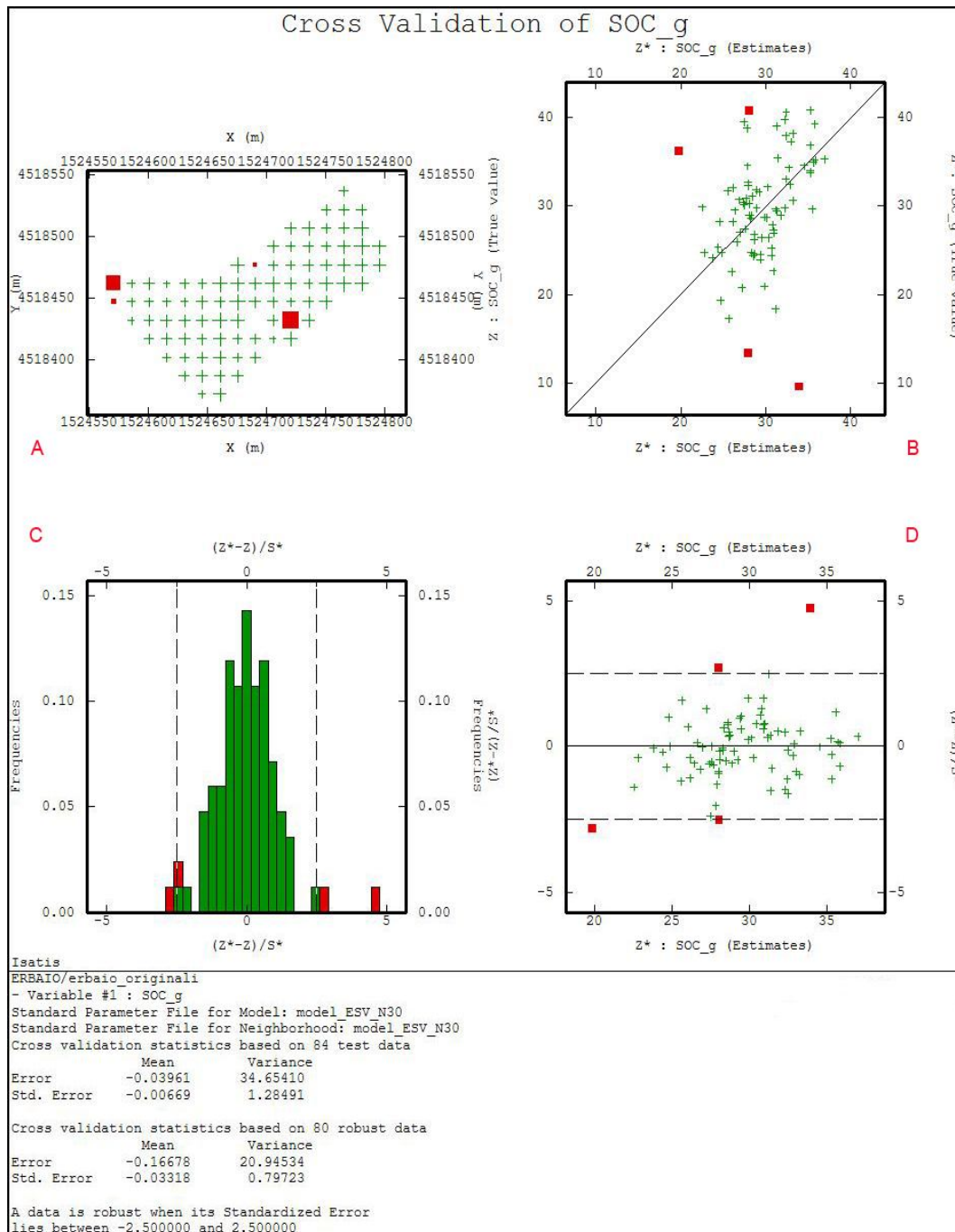


Figura 8.15 - Risultati grafici della validazione incrociata per il modello del variogramma della variabile SOCstock nell'erbaio

La stima della variabile SOCstock nell'erbaio, ottenuta tramite ordinary kriging, è rappresentata in figura 8.16 mentre in figura 8.17 è mostrata la relativa varianza della stima; anche in questo caso si può osservare come la stima sia poco affidabile ai bordi dell'area di studio.

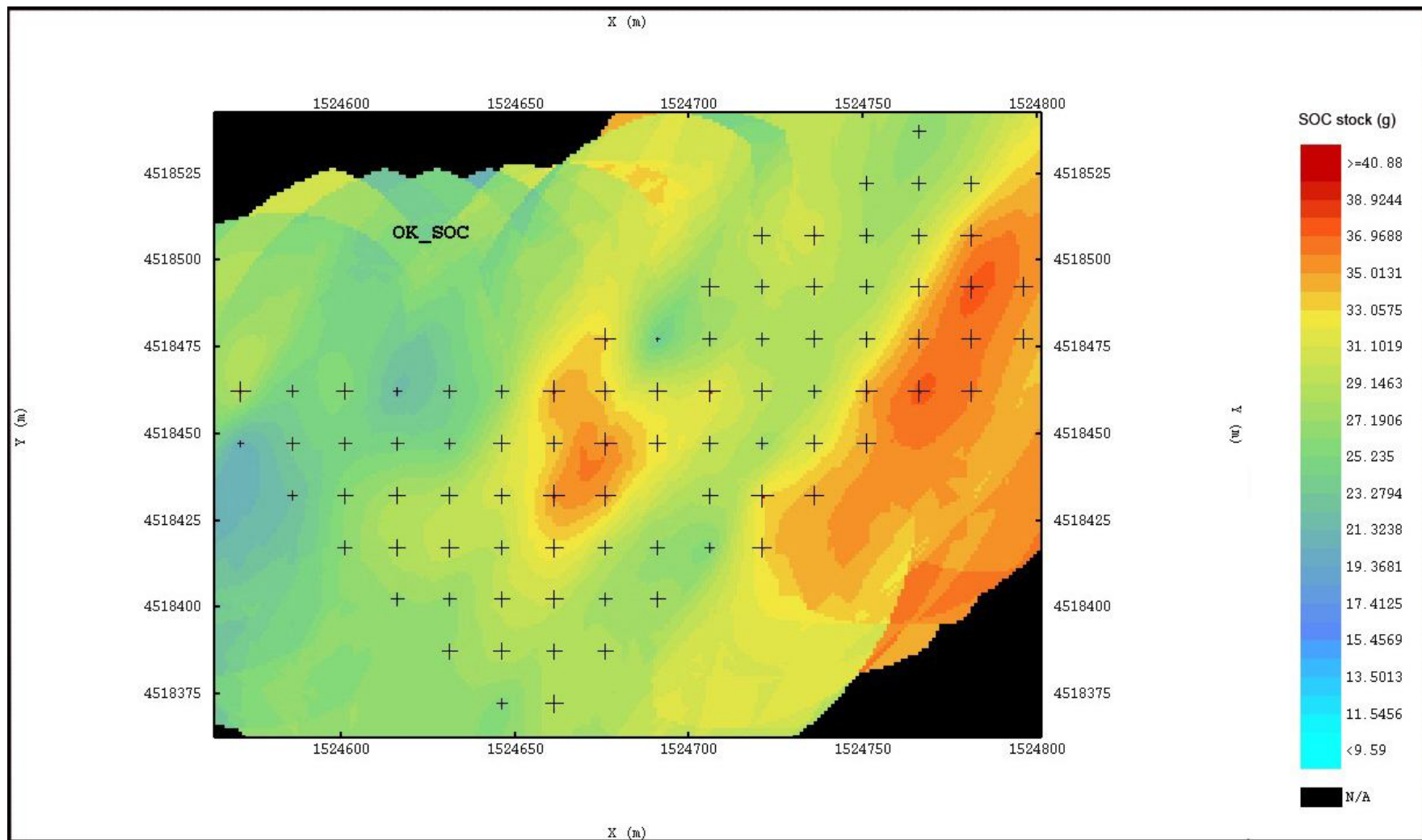


Figura 8.16 - Stima della distribuzione spaziale del carbonio organico nell'erbaio ottenuta mediante ordinary kriging

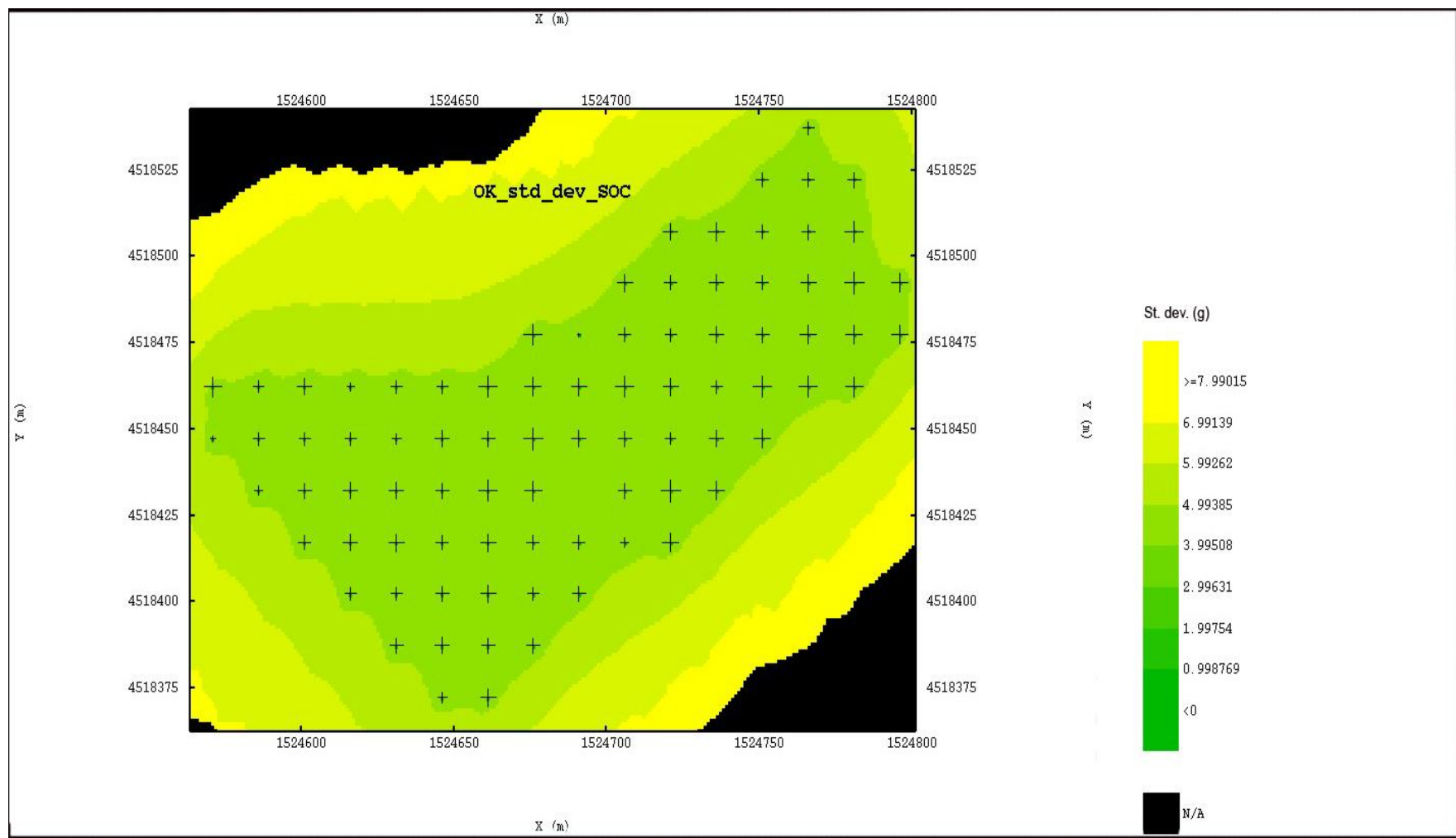


Figura 8.17 - Varianza della stima della variabile SOCstock nell'erbaio

9. CONCLUSIONI

Questo lavoro, condotto su scala macro-parcellare e limitato alle due tipologie di uso del suolo pascolo ed erbaio autunno-vernino, rappresenta la prima fase di un lavoro più ampio e già avviato che riguarderà l'intera serie di vegetazione considerata nell'ambito del progetto FISR "Cambiamenti Climatici e Sistemi Produttivi Agricoli e Forestali: Impatto sulle Riserve di Carbonio e sulla Diversità Microbica del Suolo" (SOILSINK).

Inoltre, la valutazione della variazione spaziale del carbonio nel suolo sarà in futuro estesa all'intero bacino Berchidda-Monti nel quale gli usi suolo pascolo ed erbaio rappresentano circa il 50% della superficie totale.

Lo studio condotto si è rivelato indispensabile per la comprensione delle dinamiche di variabilità del carbonio nei suoli e nelle situazioni considerate, e costituisce un punto di partenza per l'estensione degli studi relativi alla quantificazione degli stock di carbonio ai suoli e alle tipologie di sistemi colturali presenti all'interno del bacino di studio considerato. Infatti, la variabilità spaziale del carbonio organico e della densità apparente condiziona il numero di campioni da prelevare per poter individuare una variazione negli stock di carbonio del suolo.

L'analisi geostatistica condotta mette in evidenza sia nel pascolo che nell'erbaio una direzione lungo la quale l'autocorrelazione tra i campioni è maggiore rispetto a tutte le altre direzioni. Nel pascolo ad esempio, il semivariogramma relativo alla direzione N50° presenta un tasso di crescita inferiore rispetto a quello per la direzione N140°; ciò indica l'esistenza di un'autocorrelazione più robusta nella direzione N50°. I differenti range dei semivariogrammi indicano il tasso di variazione dei campioni nelle due direzioni; per osservare la stessa quantità di variazione nelle due direzioni è necessario percorrere una distanza maggiore in direzione N50°; questo si traduce in una densità di campionamento differenziata lungo le due direzioni, con conseguente risparmio in termini di costi ed energie necessarie per il campionamento e per la successiva analisi.

Alla scala di osservazione parcellare l'analisi condotta ha messo in evidenza una discreta omogeneità entro e tra usi suolo e, per quanto riguarda le variabili topografiche di pendenza ed esposizione, non è stata riscontrata alcuna influenza

significativa delle stesse sul contenuto di carbonio organico del suolo. Probabilmente l'influenza di tali variabili, che secondo alcuni autori (Don et al., 2007) possono avere una notevole influenza sul contenuto di sostanza organica del terreno, si rende visibile ad una scala di osservazione maggiore.

Nelle condizioni di suolo indisturbato, individuabili in corrispondenza delle aree sottochioma in entrambi gli usi suolo considerati, la variazione verticale della sostanza organica e della densità apparente mostra un andamento caratteristico, cioè la densità apparente aumenta con la profondità mentre la concentrazione di carbonio organico decresce in maniera tendenzialmente esponenziale con l'aumento della profondità; nelle aree fuori chioma invece, soggette a frequente o saltuaria lavorazione, la densità apparente si mantiene pressoché costante all'aumentare della profondità mentre la concentrazione di carbonio organico ha un andamento irregolare, non modellabile.

Rispettivamente nell'erbaio e nel pascolo, gli effetti delle lavorazioni hanno comportato un'alterazione dell'andamento spaziale tipico; in particolare la superficie ad erbaio, caratterizzata dalla maggiore frequenza di annate in cui il suolo è sottoposto a lavorazione, ha mostrato la maggiore omogeneità lungo il profilo.

Anche la meno frequente lavorazione del suolo condotta sul pascolo è in grado di influenzare sensibilmente l'andamento lungo il profilo verticale della concentrazione di carbonio organico.

La valutazione della variazione spaziale del carbonio del terreno, negli usi suolo pascolo ed erbaio, ha consentito inoltre la verifica sperimentale della omogeneità spaziale delle superfici sperimentali rispetto alla caratterizzazione preliminare e puntuale derivante dai profili, sulle cui aree di intorno sono stati previsti degli approfondimenti a carattere modellistico, riguardanti lo studio della dinamica della sostanza organica in scenari climatici futuri.

Con l'ausilio del modello digitale del terreno (DEM) appositamente creato per il bacino in studio sarà possibile condurre un'analisi ad una scala spaziale maggiore, che consenta di verificare l'esistenza o meno di relazioni tra variabili ambientali continue (quali pendenza ed esposizione) e variabili misurate a scala puntuale (contenuto di carbonio organico e densità apparente del terreno), allo scopo di

valutare l'effetto, alla scala di bacino, derivante dall'orografia dei siti di campionamento sulla distribuzione del carbonio organico nel suolo.

Ringraziamenti

Eccomi qui, alla fine di questi tre anni nei quali ho avuto l'opportunità di crescere dal punto di vista professionale e di conoscere persone splendide.

Innanzitutto ringrazio il dott. Casu, il sig. Casu ed il sig. Sircana, per aver consentito la realizzazione delle prove sperimentali nelle loro aziende private situate in agro di Berchidda; grazie anche al sig. Gianni, per aver risposto con pazienza e precisione a tutte le nostre domande.

Un grazie al dott. Luigi Ledda, preziosa guida scientifica e punto di riferimento, sempre prodigo di consigli e disponibile ad ascoltare e prendere in considerazione il mio punto di vista, sia che fosse sensato e sia che fosse un tantino "fantascientifico".....

Desidero ringraziare di cuore una persona splendida: Mario Deroma, per i preziosi consigli e per la disponibilità e la collaborazione alla pianificazione del piano di campionamento e analisi chimico fisiche, e per la capacità di trasmetterci il buonumore anche davanti a circa 500 campioni in attesa di essere analizzati....

Grazie di cuore ai colleghi storici nonché amici Simona Muroni e Mauro Salis, sempre disponibili a dispensare preziosi consigli; grazie anche ai "nuovi colleghi" Paola Deligios, Roberta Farci, Roberto Lai, Annapaola Chergia e M. Carmela Caria, per la preziosa collaborazione alla realizzazione di questa tesi.

Un grazie infinito alla cara amica Emma Rapposelli a Giovanna Porcu e a Rita per il preziosissimo aiuto nella conduzione delle analisi chimiche: grazie ragazze, senza il vostro aiuto non ce l'avrei mai fatta!!!

Un grazie anche ai colleghi Marcello Lizzeri e Francesco Piras, per il prezioso aiuto nel collezionamento dei campioni di suolo (meritate il titolo di campioni italiani di "carotaggio con trivella manuale").

Grazie ai compagni di avventura, i colleghi del XXI ciclo, in particolare all'amica Valentina Bacciu, perchè sostenendoci a vicenda siamo riuscite a superare i momenti "grigi" (e adesso cara Vale, ci meritiamo due giorni di shopping sfrenato!!!).

Un grazie anche all'amico e collega Daniele Pittalis, allegro compagno di viaggio e soprattutto "di mangiate" durante il corso di geostatistica a S. Giovanni Valdarno.

Grazie alla dott.ssa Giovanna Seddaiu e a Rita Porcu, per il prezioso aiuto nella revisione della tesi.

Desidero inoltre ringraziare la cara Nunzia Tramontana, per la sua infinita disponibilità sia dal punto di vista lavorativo che personale: Grazie Nunzia, persone splendide come te non se ne trovano tante in giro.

Grazie infinite a Silvia Atzeni, l'amica migliore che si possa desiderare, perchè se sono arrivata sin qui è anche merito suo.

Grazie alla coinquilina ed amica Margherita Apuzzo, per la sua allegria e soprattutto per avermi fatto trovare sempre qualcosa di pronto da mangiare tutte le volte che rincasavo alle tre, morta di fame!!!

Un grazie a tutta la mia famiglia, che mi è stata sempre vicino e non mi ha fatto mai mancare il sostegno e l'affetto.

Un pensiero speciale per Luca, compagno di avventura e di vita, per il grande aiuto nella stesura della tesi e per aver condiviso con me questo percorso standomi sempre vicino.

Infine, un grazie all'amico Pino, sempre pronto a tendere una mano di aiuto nel momento del bisogno.

BIBLIOGRAFIA

- Albrecht A., Kandji S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99: 15-27.
- Alvarez R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage. *Soil Use and Management*, 21: 38-52.
- Barca S., Carmignani L., Oggiano G., Pertusati P.C., Salvatori I., 1996. Carta Geologica della Sardegna, Servizio Geologico Nazionale, Carmignani L. (ed.). Litografia Artistica Cartografica, Firenze.
- Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Lesaint S., Oliver R., Feller C., 2004. Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, 20: 231-239.
- Bezdicsek D.F., Papendick R.I., Lal R., 1996. Importance of soil quality to health and sustainable land management. In: J.W. Doran, A.J. Jones (Eds.) "Methods for assessing soil quality", *Soil Sci. Soc. am. Special Pub.* 49, ASA-SSSA, Madison, WI: 1-8.
- Blasi, C., Carranza M.L., Frondoni R., Rosati L., 2000. Ecosystem classification and mapping: a proposal for Italian landscapes. *Applied Vegetation Science* 3: 233-242.
- Bouwman A., 2001. Global Estimates of Gaseous Emissions from Agricultural Land. FAO, Rome, 106 pp.
- Braun-Blanquet J., 1951. *Pflanzensoziologie. Grundzüge der vegetationnskunde*. Springer-Verlag, Wien.
- Bray J.R., Curtis J.T., 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* 27: 325-349.
- Burrough P.A. 1986 - *Principles of geographical information systems for land resource assessment*, Clarendon Press, Oxford, U.K.
- Burroughs, P.A., McDonald R., *Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems and Geostatistics)*, Oxford University Press.
- Campbell C.A., Souster W., 1982. Loss of organic matter and potentially mineralizable N from Saskatchewan soils due to cropping. *Can. J. Soil Sci.* 62: 652-656.
- CAST, 1992. Preparing U.S. agriculture for global climate change. Council for Agricultural Science and Technology, Task Force Report No. 199, Washington, D.C., 96 pp.

- Castrignanò, A., Giugliarini, L., Martinelli, N. e Risaliti, R., 2000a. Study of spatial relationships among soil physical-chemical properties using Multivariate Geostatistics. *Geoderma*, 97: 39-60.
- Castrignanò, A., Goovaerts, P., Lulli, L., Bragato, G. e Gardin, L., 2000b. A geostatistical approach to estimate probability of occurrence of *Tuber melanosporum* in relation to some soil properties. *Geoderma*, 98: 95-113
- Christakos, G. 1992. *Random Field Models in Earth Sciences*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 474 p.
- Cole C.V., Cerri, C., Minami K., Mosier A., Rosenberg N., Sauerback D., Dumanski J., Duxbury J., Freney R., Gupta R., Heinemeyer O., Kolchugina T., Lee J., Paustian K., Powlson D., Sampson N., Tiessen H., van Noordwijk M., Zhao Q., 1996. Chapter 23. Agricultural Option for Mitigation of Greenhouse Gas Emission. In: *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. IPCC Working Group II, Cambridge University Press, pp 745-771.
- Cole V., Cerri C., Minami K., Mosier A., Rosenberg N., Sauerbeck D., 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. (Eds.), *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 744–771.
- Conant R.T., Paustian K., 2002. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (4), 1143 pp., doi:10.1029/2001GB001661.
- Conant R.T., Paustian K., Del Grosso S.J., Parton W.J., 2005. Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71: 239-248.
- Conant R.T., Paustian K., Elliott E.T., 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11: 343-355.
- Cressie, N.A.C., 1991. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and Sons, New York, 900 pp.
- Don A., Schumacher J., Scherer-Lorenzen M., Scholten T., Schulze E.D., 2007. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites – Implication for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141: 272-282.
- Doran J.W., Parkin T.B., 1994. Defining and assessing soil quality. In: J.W. Doran *et al.* (Eds.) "Defining soil quality for a sustainable environment". *Soil Sci. Soc. Am. Special Pub.* 35, ASA-SSSA, Madison, WI: 3-21.
- Enquete Commission, 1992. *Climate Change: a threat to global environment*. Economica Verlag, Bonn, Germany, 235 p.

- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, R., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 192–194.
- F.A.O., 1990 - Guidelines for soil description. 3th ed. (revised), Roma.
- FAO, 1992. Current world fertilizer situation and outlook. FAO, Rome, Italy.
- FAO, ISSS, ISRIC, 2006. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resource Report n. 103, Roma.
- Follett R.F., 2001. Organic carbon pools in grazing land soils. In *The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. R.F. Follett, J.M. Kimble, and R. Lal (eds.), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 65-86.
- Freibauer A., Rounsevell M., Smith P., Verhagen A., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122: 1-23.
- Géhu J.-M., Rivas-Martinez S., 1981. Notions fondamentales de phytosociologie. *Ber. Int. Simp. Int. Vereinigung Vegetationsk*: 5-33.
- Goovaerts, P. e Journel, A.G., 1995. Integrating Soil Map Information In Modelling The Spatial Variation Of Continuous Soil Properties. *European Journal Of Soil Science*, 46: 397-414.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford Univ. Press, New York, 483 pp.
- Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89: 1-45.
- Gregorich E.G., Rochette P., van den Bygaart A.J., Angers D.A., 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, 83: 53-72.
- Gregorich G., Anderson D.W., 1985. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in the Canadian prairies. *Geoderma*, 36: 343–354
- Greuter W., Burdet H. M., Long G., 1984-89. *Med-Checklist*, voll.I-IV. Genève, Suisse.
- Houghton J.T., Ding D.J., Griggs D.J., Nogueir M., van der Linden P.J., Xiaosu D. (Eds.), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, p. 892.
- Houghton R.A., 1995. Change in storage of terrestrial carbon since 1850. In Lal R., Kimble J., Lavine E., Steward B.A. (Eds.) *"Soil and Global Change"*. CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL
- Ioannelli M., Schiavoni U.M.A., 2005. *Fondamenti di Sistemi Informativi Geografici*, Edizione TexMAT.
- IPCC, 1990. *Climate change - The IPCC Impacts Assessment*.

- IPCC, 1997. Special Report: The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for Policymakers.
- IPCC, 2000. Special Report: Land use, Land use change and forestry. Summary for Policymakers.
- IPCC, 2001. Third Assessment Report, Working Group I. Summary for Policymakers.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY. 561 pp.
- Izaurrealde R.C., McGill W.B., Robertson J.A., Juma N.G., Thurston J.J., 2001. Carbon balance of the Breton classical plots over half a century. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 431-441.
- Johnson M.G., Kern J.S., 1991. Sequestering C in soils: A workshop to explore the potential for mitigating global climate change. USEPA Rep. 600/3-91-031. USEPA Environ. Res. Lab., Corvallis, OR.
- Knowles, T.A., Singh, B., 2003. Carbon storage in cotton soil of northern New South Wales. *Australian Journal of Soil Research* 41: 889–903.
- Koga N., Sawamoto T., Tsuruta H., 2006. Life cycle inventory-based analysis of greenhouse gas emissions from arable land farming systems in Hokkaido, northern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52: 564-574.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1627.
- Lal, R., Kimble, J.M., 2001. Importance of soil bulk density and methods of its importance. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publishers, London, pp. 31–44.
- Liebig M.A., Morgan J.A., Reeder J.D., Ellert B.H., Gollany H.T., Schuman G.E., 2005. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. *Soil & Tillage Research*, 83: 25-52.
- Madari B., Machado P.L.O.A., Torres E., Andrade A.G., Valencia L.I.O., 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 80: 185-200.
- Mahlman J.D., 1997. Uncertainties in projections of human-caused climate warming. *Science* 278: 746-1417.
- Mann L.K., 1985. A regional comparison of C in cultivated and uncultivated Alfisols and Mollisols in central United States. *Geoderma* 36: 241-253.
- Marland G., West T.O., Schlamadinger B., Canella L., 2003. Managing soil organic carbon in agriculture: the net effect on greenhouse gas emissions. *Tellus* 55B: 613-621.

- McBratney, A.B., Hart, G.A., McGarry, D., 1991. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.*, 42: 513-532.
- Miller, P.M., Singer, M.J., Nielsen, D.R., 1998. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hill. *Soil Sci. Soc. Am J.* 52: 1133–1141.
- MiPAF, 2000. Metodi di analisi chimica del suolo. Osservatorio Nazionale Pedologico e per la Qualità del suolo.
- Murage, E.W., Karanja, N.K., Smithson, P.C., Woomer, P.L., 2000. Diagnostic indicators soil quality in productive and non productive smallholders fields of Kenya's Central Highlands. *Agr. Ecosyst. Environ.* 79: 1-8.
- Ogle S.M., Breidt F.J., Paustian K., 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 72: 87-121
- Oliver, M.A., Webster, R., 1986. Semi-variograms for modelling the spatial pattern of landform and soil properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 11, 491–504.
- OSTP, 1997. Climate Change: State of the Knowledge. Office of Science Technology Policy, Washington, D.C., 18 pp.
- Pierson, F.B., Mulla, D.J., 1990. Aggregate stability in the Palous region of Washington: effect of landscape position. *Soil Sci. Soc. Am J.* 54: 1407–1412.
- Pignatti S., 1982. Flora d'Italia. Voll. I-III. Edagricole, Bologna.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J., Stangenberger, A.G., 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298 (8): 156–159.
- Puget, P., Lal, R., 2005. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research* 80(1–2): 201–213.
- Rasmussen P.E., Collins H.P., 1991. Long-term impacts tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Adv. Agron.* 45: 93-134.
- Rasmussen P.E., Parton W.J., 1994. Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. Inputs, yield and soil organic matter. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 58: 523-530.
- Reeder J.D., Schuman G.E., Morgan J.A., Lecain D.R., 2004. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe. *Environmental Management*, 33: 485-495.
- Rice C.W., Owensby C.E., 2001. Effects of fire and grazing on soil carbon in rangelands. In *The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. R. Follet, J.M. Kimble, and R. Lal (eds.), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 323-342.

- Rivas-Martinez S. & Rivas Sáenz S., 2007 – <http://www.globalbioclimatics.org/>
- Rivas-Martínez S., Díaz T.E., Fernández-Gonzalez F., Izco J., Loidi J., Lousã M., Penas A., 2002. Vascular plant communities of Spain and Portugal. *Itinera Geobotanica*, 15 (2): 433-922.
- Rivas-Martínez, 1976. Sinfitosociologia, una nueva metodología para el estudio del paisaje vegetal. *Ann. Inst. Bot. Cavillanes*, 33:179-188.
- Rodhe H., 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science* 248: 1217-1219.
- Ross, D.J., Tate, K.R., Scott, N.A., Feltham, C. W., 1999. Land-use change: Effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 31(6): 803–813.
- Sass R.L., 1994. Short summary chapter for methane. In Minami K., Mosier A., Sass R. (Eds.) "CH₄ and N₂O: global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources". NIAES, Tsukuba, Japan: 1-7.
- Saxton K.E., Willey P.H., 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In *Watersheds Models*, V.P. Singh, D.K. Frevert. CRC Press.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. e Papendick, R.I., 1986. Estimating generalised soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031-1036.
- Schimel D.S., 1986. Carbon and N turnover in adjacent grassland and cropland ecosystems. *Biogeochemistry* 2: 345-357.
- Schlesinger W.H., 1995. An overview of the global carbon cycle. In Lal R., Kimble J., Lavine E., Steward B.A. (Eds.) "Soil and Global Change". CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL: 9-25.
- Schuur, E.A.G., Chadwick, O. A., Matson, P. A., 2001. Carbon cycling and soil carbon storage in Mesic to wet Hawaiian Montane forest. *Ecology* 82(11): 3182–3196.
- Sequi P., 1989. Sostanza organica e ciclo del carbonio. In: *Chimica del suolo*, Ed. Patron, 1989.
- Shibata M., 1994. Methane production in ruminants. In Minami K., Mosier A., Sass R. (Eds.) "CH₄ and N₂O: global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources". NIAES, Tsukuba, Japan: 105-115.
- Smith, P., 2004. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use and Management* 20: 264–270.
- Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T., 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247: 1431-1438.

- Tiessen H., Stewart J.W.B., Betany J.R., 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of C, N and P in grassland soils. *Agron. J.* 74: 831-835.
- Tutin T.G., Burges N.A., Chater A.O., Edmondson J.R., Heywood V.H., Moore D.M., Valentine D.H., Walters S.M., Webb D.A. (eds.), 1993. *Flora Europaea* 2nd Edition, vol. I. University Press, Cambridge, UK.
- Tutin T.G., Heywood V.H., Burges N.A., Moore D.M., Valentine D.H., Walters S.M., Webb D.A. (eds.), 1964-1980. *Flora Europaea* voll. I-V. University Press, Cambridge, UK.
- U. S. Dept. of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 1999. *Soil Taxonomy*. Agriculture Handbook n. 436, 2nd ed., Washington D.C.
- U. S. Dept. of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2006 – *Keys to Soil Taxonomy*. 10th ed., Washington D.C.
- Unger P.W., 1995a. Residue management for continuous winter wheat. *J. Soil Water Cons.*, 50: 317-321.
- Unger P.W., 1995b. Organic matter and water-stable aggregate distribution in ridge-tilled surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1141-1145.
- Valdés B., Talavera S., Fernández-Galiano E. (eds.), 1987. *Flora Vasculare de Andalucía Occidental*, voll. I-III. Ketres Editoria S.A., Barcelona, España.
- Venteris, E.R., McCarty, G.W., Ritchie, J.C., Gish, T., 2004. Influence of management history and landscape variables on soil organic carbon and soil redistribution. *Soil Science* 169 (11): 787-795.
- Wackernagel, H. 2003. *Multivariate Geostatistics: an introduction with Applications*. Springer- Verlag, Berlin, 3rd ed., 388 pp.
- Wang, J., Fu, B.J., Qiu, Y., Chen, L.D., 2001. Soil nutrients in relation to land use and slope position in the semi-arid smallwatershed on loess plateau in China. *Journal of Arid Environments* 48: 537-550.
- Wang, S.Q., Liu, J.Y., Yu, G.R., 2004. Effects of land use change on the storage of soil organic carbon: A case study of the Qianyanzhou Forest Experimental Station in China, *Climatic Change* 67(2): 247-255.
- Wang, S.Q., Zhou, C.H., 1999. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research* 18(4): 349-356.
- Webster, R., 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.* 3:1-70.
- Webster, R., 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. in Soil Sci.* 3: 2-70.
- West T.O., Post W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1930-1946.

- Zeiler, M., 1999. Modeling Our World: the ESRI Guide to Geodatabase Design, ESRI Press.
- Zhang, H.B., Luo, Y.M., Wong, M.H., Zhao, Q.G., Zhang, G.L., 2007. Soil organic carbon storage and changes with reduction in agricultural activities in Hong Kong. *Geoderma*, 139: 412-419.