



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

SISTEMI COLTURALI MEDITERRANEI

E CAMBIAMENTI CLIMATICI:

IMPATTO SULLE RISERVE DI CARBONIO NEL SUOLO

Coordinatore: Chiar.mo Prof. PIETRO DEIDDA

Docente guida: Dott. LUIGI LEDDA

Dottorando:

Dott. Luca Doro

ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

Indice

1. PREMESSA.....	4
1.1 I CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	6
1.1.1 Le cause antropiche dei mutamenti climatici.....	12
1.1.2 Il contributo delle attività agricole al cambiamento climatico.....	16
1.1.3 Ripercussioni sull'attività agricola.....	18
1.2 CAMBIAMENTI CLIMATICI: MITIGAZIONE E ADATTAMENTO.....	22
1.2.1 Mitigazione.....	22
1.2.2 Adattamento.....	25
1.3 LA SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO.....	27
1.3.1 Capacità di accumulo di carbonio nel suolo.....	29
1.4 I MODELLI DI SIMULAZIONE.....	33
1.4.1 Principi e funzionamento dei modelli di simulazione.....	34
1.4.2 Modellizzazione dell'accumulo di carbonio nel suolo.....	37
1.5 IL MODELLO DI SIMULAZIONE EPIC (ENVIRONMENTAL POLICY INTEGRATED CLIMATE).....	41
1.5.1 Descrizione del modello.....	42
1.5.1.1 Sub-modello per l'idrologia.....	42
1.5.1.2 Sub-modello climatico.....	43
1.5.1.3 Sub-modello per l'erosione del suolo.....	43
1.5.1.4 Sub modello per la dinamica degli elementi nutritivi nel suolo. .	44
1.5.1.5 Sub-modello per la simulazione della temperatura del suolo.....	44
1.5.1.6 Sub-modello per la simulazione della crescita delle piante.....	45
1.5.1.7 Sub-modello lavorazioni.....	47
1.5.1.8 Sub-modello per la simulazione dei fattori che controllano l'ambiente di coltivazione.....	48
1.5.1.9 Sub-modello per l'economia del sistema.....	49
1.5.2 Implementazione del modello EPIC per la simulazione della dinamica della sostanza organica nel suolo.....	49
1.5.2.1 Approccio concettuale.....	49
1.5.2.2 Ripartizione dei componenti della lettiera.....	52
1.5.2.3 Trasformazioni potenziali del carbonio e dell'azoto.....	54
1.5.2.4 Allocazione dei componenti trasformati.....	57
1.5.2.5 Trasformazioni effettive di carbonio ed azoto.....	59
1.5.2.6 Dinamica della densità apparente nel modello EPIC.....	63
1.5.2.7 Gestione del carbonio e dell'azoto e altre caratteristiche di EPIC paragonate ad altri modelli per la simulazione della sostanza organica nel terreno.....	64
1.5.3 Il software WinEPIC.....	65
2 OBIETTIVI DI STUDIO.....	80
3 MATERIALI E METODI.....	82
3.1 INDIVIDUAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA DI STUDIO.....	82
3.1.1 Caratterizzazione meteorologica e climatologica.....	83
3.1.1.1 Analisi bioclimatica dell'area di studio.....	83
3.1.1.2 Creazione file meteorologico di input per il modello EPIC.....	86
3.1.2 Caratterizzazione floristica e vegetazionale.....	87

3.1.3	Caratterizzazione pedologica e raccolta dati pedologici.....	93
3.1.3.1	Caratterizzazione pedologica.....	93
3.1.3.2	Raccolta delle informazioni pedologiche richieste dal modello. .	97
3.1.4	Caratterizzazione agronomica e raccolta dati relativi alla serie di vegetazione.....	102
3.1.4.1	Acquisizione dei dati agronomici richiesti dal modello tramite interviste.....	106
3.1.4.2	Acquisizione diretta dei dati agronomici richiesti dal modello.	107
3.1.5	Procedura seguita per la simulazione della dinamica del carbonio nel suolo.....	111
3.1.5.1	Calibrazione del modello.....	111
3.1.5.1.1	Inserimento delle informazioni pedologiche.....	111
3.1.5.1.2	Inserimento delle informazioni agronomiche.....	113
3.1.5.1.3	La finestra "Parm Editor".....	114
3.1.5.1.4	La finestra "Control Table".....	119
3.1.5.1.5	Analisi statistica.....	120
3.1.5.2	Inizializzazione dei pool di carbonio.....	124
3.1.5.3	Simulazione della dinamica del carbonio in relazione alla differente gestione agricola e a differenti scenari climatici per il periodo 2010-2099.....	125
4	RISULTATI E DISCUSSIONI.....	133
4.1	CARATTERIZZAZIONE PEDOLOGICA.....	133
4.2	CARATTERIZZAZIONE AGRONOMICA.....	139
4.3	VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	142
4.2	SIMULAZIONE DELLA DINAMICA DELLA SOSTANZA ORGANICA NEL SUOLO.....	151
4.3	SIMULAZIONI EFFETTUATE UTILIZZANDO GLI SCENARI CLIMATICI FUTURI.....	162
5.	CONCLUSIONI.....	208
	BIBLIOGRAFIA.....	211

1. PREMESSA

Fino a tempi recenti, i cambiamenti del clima sono avvenuti solo a causa di fenomeni naturali come le variazioni dell'attività solare o della circolazione oceanica. Adesso è invece chiaro che anche le attività antropiche, come l'uso dei combustibili fossili e le variazioni d'uso del suolo (es. la deforestazione), hanno la loro influenza.

La causa principale, ma non unica, delle variazioni climatiche dovute alle attività antropiche è l'aumento nell'atmosfera dei gas ad effetto serra che, negli ultimi anni, hanno raggiunto livelli ben al di là dei valori soglia naturali che consentono alla superficie terrestre e alla bassa atmosfera di mantenere temperature compatibili con la vita sul nostro pianeta.

L'aumento delle emissioni di anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e ossido di azoto (N₂O), a causa dalle attività antropiche, sistema agroforestale incluso, provoca un maggiore riscaldamento dell'atmosfera che incrementa la formazione di vapore acqueo che, a sua volta, causa un ulteriore aumento della temperatura.

Recentemente il problema del riscaldamento globale derivante dall'aumento delle emissioni di gas ad effetto serra (tra i quali soprattutto anidride carbonica) ha stimolato l'interesse delle comunità scientifiche sull'uso dei terreni agricoli come serbatoio (*sink*) per lo stoccaggio della CO₂ in eccesso. La misura, peraltro prevista dall'art. 3.4 del Protocollo di Kyoto, 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.

L'interesse per le funzioni del suolo, ed il ciclo del carbonio in particolare, non è nuovo. Ci si è sempre chiesti, infatti, come le variazioni del carbonio influenzassero la produttività globale degli ecosistemi o quale fosse la migliore gestione dei terreni per aumentarne la produttività. Oggi però è necessario considerare gli effetti dell'uso e della gestione agricola dei suoli al di là dei confini dell'azienda e capire che l'alterazione dei cicli biogeochimici del carbonio e di altri elementi a livello di azienda può comportare l'alterazione di questi cicli in un'altra parte dell'ecosistema globale.

E' comunque auspicabile assicurare la produttività agricola migliorando e preservando allo stesso tempo la salute e la funzionalità dell'intero ecosistema terrestre e considerare l'accumulo di carbonio nel suolo come una misura del progresso verso la riduzione delle emissioni di CO₂.

1.1 I CAMBIAMENTI CLIMATICI

Con "cambiamenti climatici" (o mutamenti climatici) si indicano le variazioni a livello globale del clima della Terra. Essi si producono, a diverse scale temporali, su tutti i fattori meteorologici come: temperatura massima e minima, precipitazioni e temperatura degli oceani. Spesso il termine mutamento climatico viene però utilizzato per riferirsi al cambiamento climatico che si sta verificando negli anni recenti utilizzandolo quindi come sinonimo di "riscaldamento globale". Nel corso della storia del pianeta Terra tali cambiamenti si sono verificati per cause naturali ma, negli ultimi secoli, si ritiene che anche l'azione dell'uomo possa aver contribuito a tali mutamenti.

Nel 1979 la prima conferenza mondiale sui cambiamenti climatici aveva avviato la discussione su come prevedere e prevenire potenziali cambiamenti climatici causati da attività umane che avrebbero potuto avere un effetto negativo sul benessere dell'umanità. Alla base di questa discussione c'era l'osservazione, da parte degli scienziati, di una tendenza all'aumento della temperatura media globale di gran lunga superiore a quella registrata in passato e il sospetto che tale riscaldamento non avesse solo cause naturali.

La crescente attenzione sul tema da parte della comunità internazionale ha portato, nel 1988, alla creazione dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento del Clima). L'IPCC definisce i mutamenti climatici come un cambiamento duraturo nel tempo, alcuni decenni o più, dei valori medi e/o della variabilità dei fattori climatici che può essere identificato, ad esempio, tramite l'utilizzo di test statistici. Tale definizione fa riferimento ad ogni cambiamento del clima sia dovuto a fattori naturali che attribuibile all'attività dell'uomo. Tale definizione differisce da quella data dall'UNFCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change) dove con "cambiamento climatico" ci si riferisce a quei mutamenti del clima attribuibili direttamente o indirettamente alle attività dell'uomo che vanno a modificare la composizione dell'atmosfera e i cui effetti si sommano alla naturale variabilità climatica osservata in un analogo periodo di tempo (IPCC, 2007).

Compito dell'IPCC è la valutazione delle informazioni disponibili nei campi scientifico, tecnico e socio-economico legate ai cambiamenti climatici, dei loro

possibili impatti e delle opzioni di adattamento e/o di mitigazione.

Nel suo quarto rapporto di valutazione gli scienziati dell'IPCC affermano che il riscaldamento del clima è inequivocabile ed evidente grazie alle osservazioni relative all'incremento della temperatura media dell'aria e degli oceani, al diffuso scioglimento delle nevi perenni e dei ghiacciai e all'innalzamento del livello del mare (Trenberth *et al.*, 2007).

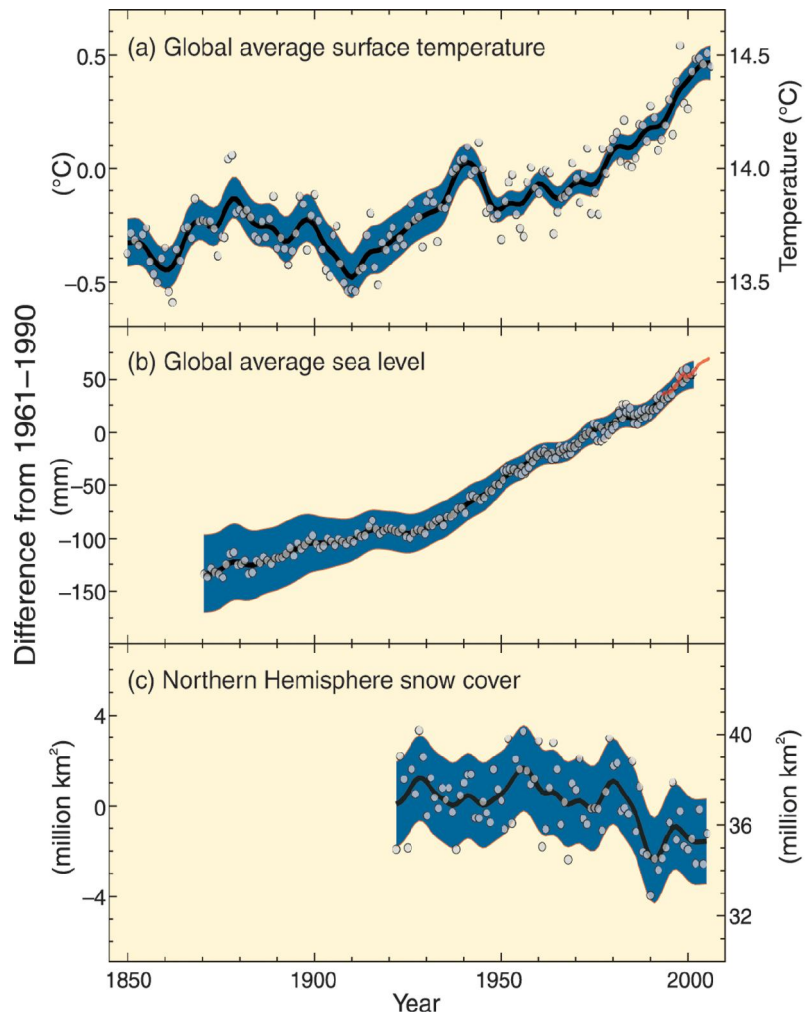


Figura 1.1 - Variazioni di temperatura, livello del mare e superficie coperta dalle nevi nell'emisfero nord. (IPCC, 2007).

Già nel terzo rapporto di valutazione prodotto dall'IPCC si riportava come il clima terrestre si stesse riscaldando facendo registrare un aumento della temperatura media sulla superficie terrestre di circa 0,6°C nell'ultimo secolo e si dichiarava che la maggior parte delle cause di tale riscaldamento sono attribuibili alle attività

umane ed in particolare all'aumento delle emissioni di gas-serra (Trenberth *et al.*, 2007). Durante gli ultimi 200 anni infatti le attività antropiche hanno innalzato, arrivando a livelli mai raggiunti prima, la concentrazione atmosferica di CO₂, CH₄, N₂O e di altri gas responsabili dell'effetto serra e si ritiene che questo possa essere la causa principale dell'attuale mutamento climatico (Houghton *et al.*, 2001).

In futuro, ad un ulteriore aumento delle emissioni di gas-serra potrebbero essere associati altri mutamenti significativi rispetto al passato. Potrebbero infatti verificarsi: un ulteriore riscaldamento dell'atmosfera, una modifica della quantità e tipologia delle precipitazioni, un aumento del livello del mare, cambiamenti nella frequenza degli eventi climatici estremi, come ad esempio alluvioni, periodi di siccità estrema, cicloni, ecc. (fonte APAT¹).

È però doveroso precisare che l'effetto serra è anche un fattore naturalmente presente nell'atmosfera della Terra e che la sua esistenza è di fondamentale importanza. Infatti la naturale concentrazione dei gas ad effetto serra fa sì che la temperatura media terrestre sia di circa 15°C rispetto ai -18°C che si registrerebbero senza il normale effetto serra (Schlesinger, 1995).

Il principale gas serra è il vapore acqueo il quale, diversamente da altri gas serra, è soggetto a forti variazioni di concentrazione sia nello spazio che nel tempo. Dall'inizio della rivoluzione industriale l'uomo ha però modificato la composizione atmosferica immettendovi grandi quantità di gas serra "minori" tra i quali il più noto è l'anidride carbonica (CO₂). La concentrazione della CO₂ è andata modificandosi dalla fine del diciannovesimo secolo sino ad oggi. L'incremento della CO₂ negli ultimi vent'anni è imputabile, per tre quarti, al consumo di combustibili fossili e, per il resto, alla deforestazione. Altri gas serra minori che hanno fatto registrare un aumento della loro concentrazione nell'atmosfera, a causa delle attività umane, sono il metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O). Totalmente assenti nell'atmosfera ma introdotti recentemente a causa delle attività industriali, sono invece i clorofluorocarburi (CFC). Anche questa categoria di gas, oltre a provocare la distruzione dello strato di ozono stratosferico che ci protegge dai raggi ultravioletti provenienti dal Sole, esercita

1 APAT: Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici.

un effetto serra interagendo direttamente con la radiazione infrarossa (fonte APAT).

L'IPCC nel suo ultimo rapporto dichiara che 11 degli ultimi 12 anni (1995 - 2006) rientrano tra i primi 12 anni più caldi a partire dal 1850. Inoltre il trend lineare delle temperature di $0,74^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,18^{\circ}\text{C}$) e relativo al periodo compreso tra il 1906 ed il 2005 (100 anni) è maggiore del trend pari a $0,6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) ottenuto per il periodo corrispondente che va dal 1901 al 2000 (Figura 1.1). Inoltre il trend delle temperature per gli ultimi 50 anni (dal 1956 al 2005), pari a $0,13^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), è circa il doppio di quello relativo all'arco di tempo di cento anni che va dal 1906 al 2005.

L'aumento delle temperature è ampiamente diffuso su tutto il Pianeta ed è maggiore, nell'emisfero nord, alle più alte latitudini. La temperatura media dell'Artico infatti ha subito un incremento quasi doppio rispetto a quanto registrato per la temperatura globale negli ultimi 100 anni. Inoltre le terre emerse hanno fatto registrare una velocità nell'aumento delle temperature maggiore rispetto a quanto osservato per gli oceani. Le osservazioni effettuate a partire dal 1961 mostrano come sia possibile registrare un aumento delle temperature degli oceani sino a profondità di 3000 metri e come gli oceani abbiano assorbito circa l'80% del calore che si è aggiunto al sistema climatico globale. Infine, nuove misurazioni, effettuate sia tramite l'utilizzo di palloni meteorologici che di satelliti, evidenziano come anche gli strati più bassi della troposfera mostrino un incremento delle temperature simile a quanto osservato per gli strati dell'atmosfera più prossimi alla superficie terrestre (Trenberth *et al.*, 2007).

Oltre all'aumento delle temperature gli studiosi dell'IPCC hanno osservato un corrispondente innalzamento del livello dei mari (Figura 1.1) con un tasso medio di $1,8 \text{ mm anno}^{-1}$ ($\pm 0,5$) per il periodo di tempo che va dal 1961 al 2003. Tale valore sale a circa $3,1 \text{ mm anno}^{-1}$ ($\pm 0,7$) se si considera il periodo compreso tra il 1993 e il 2003. Non è però chiaro se tale rapido incremento rifletta una variazione decennale o un aumento nel trend di lungo periodo. Dal 1993 l'espansione termica degli oceani ha contribuito per circa il 57% all'innalzamento totale del livello dei mari mentre lo scioglimento di ghiacciai e nevi perenni e lo scioglimento della calotta polare hanno contribuito rispettivamente per il 28% e 15% (IPCC, 2007).

Anche lo scioglimento dei ghiacciai risulta legato all'aumento delle temperature. Dati derivati dai satelliti e raccolti a partire dal 1978 mostrano una riduzione dell'estensione dei ghiacci al Polo Nord: tale valore pari al 2,7% per decade ($\pm 0,6$) aumenta a 7,4% ($\pm 2,4$) nel periodo estivo. Su tutta la Terra è stata inoltre osservata una riduzione delle superfici occupate dai ghiacciai e delle nevi perenni; infatti la massima estensione delle superfici ghiacciate durante il periodo invernale ha subito, nell'emisfero nord, una riduzione di circa il 7% a partire dal 1900 con riduzioni per il periodo primaverile-estivo che arrivano al 15%. Infine nello stato più superficiale del permafrost artico è stato registrato, a partire dal 1980, un aumento della temperatura di 3°C (Lemke, *et al.*, 2007).

Sia a scala continentale che a scala regionale, sono stati osservati cambiamenti in altri fattori climatici. Fra i tanti parametri si riporta ad esempio quanto osservato per le precipitazioni per le quali si è registrato, per il periodo che va dal 1900 al 2005, un'alterazione nella quantità di pioggia caduta. In tale periodo le precipitazioni sono aumentate in maniera significativa nella parte orientale del nord e del sud America, nel nord Europa e nelle zone centrali e meridionali dell'Asia; mentre, nello stesso periodo, le precipitazioni sono diminuite nel Sahel, nel bacino del Mediterraneo, nel sud Africa e in parte dell'Asia meridionale. Inoltre le analisi dei risultati consentono di affermare, con un certo grado di probabilità, che a livello globale le aree colpite dalla siccità sono aumentate se paragonate a quanto osservato nel 1970 (Trenberth *et al.*, 2007).

A causa dell'attuale cambiamento climatico alcuni eventi meteorologici hanno fatto registrare, negli ultimi 50 anni, un aumento della loro frequenza e/o intensità. Con un grado di probabilità compreso tra il 95 e 90% in molte aree le gelate notturne sono diventate meno frequenti mentre sono aumentati i giorni e le notti caratterizzati da temperature al di sopra della media. Sempre l'IPCC afferma che, con una probabilità compresa tra il 90 ed il 66%, le ondate di caldo sono diventate più frequenti così come è aumentata la frequenza degli eventi piovosi caratterizzati da elevata intensità. Inoltre le osservazioni effettuate permettono di affermare che dal 1970 si è verificato un incremento dei tifoni tropicali nel nord Atlantico ed è stato ipotizzato, per alcune aree dove la qualità dei dati raccolti ha permesso uno studio più approfondito, un incremento dall'attività dei cicloni.

Infine si riporta che, con una probabilità compresa tra il 95 e 90%, la temperatura media dell'emisfero nord, nella seconda metà del ventesimo secolo, è più alta di qualunque altro analogo arco di tempo negli ultimi 500 anni (Jansen *et al.*, 2007).

1.1.1 Le cause antropiche dei mutamenti climatici

Come ipotizzato già nel terzo rapporto dell'IPCC, parte del riscaldamento globale è attribuibile alle attività antropiche e fra queste hanno sicuramente notevole importanza quelle che determinano l'immissione nell'atmosfera di gas aventi proprietà tali da poterli definire "gas serra".

Tali gas sono sia di origine naturale che sintetica. I gas naturali includono il vapore acqueo, l'anidride carbonica (diossido di carbonio, CO₂), l'ossido di carbonio (CO), il metano (CH₄), il protossido di azoto (monossido di diazoto, N₂O), l'ossido di azoto (NO), il perossido di azoto (diossido di azoto, NO₂) ed infine l'ozono (O₃). Inoltre, a causa delle attività umane, alcuni componenti completamente sintetici e con caratteristiche simili ai gas serra sono stati immessi nell'atmosfera sin dal 1930, tra questi rientrano diversi clorofluorocarburi e clorofluoroidrocarburi (Lal *et al.*, 1999).

Alcuni climatologi ritengono che tale aumento di concentrazione abbia causato un aumento delle temperature pari a 0,5°C ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) negli ultimi 100 anni (Mahlman, 1997). Inoltre, nei prossimi 100 anni, è previsto un ulteriore innalzamento della temperatura media globale compresa tra 1°C e 5°C a causa dall'ulteriore arricchimento atmosferico di gas serra prodotti dalle attività umane (OSTP, 1997).

La concentrazione atmosferica dei gas serra è aumentata costantemente sin dal 1850 e una parte sostanziale dell'incremento totale è stato attribuito non solo alle attività di tipo industriale ma anche alla deforestazione, alla conversione delle terre all'uso agricolo e ad altre attività legate all'agricoltura (Post *et al.*, 1982). Tale dato è confermato anche nell'ultimo rapporto dell'IPCC dove si riporta come l'emissione di gas serra determinata dalle attività umane sia aumentata dall'epoca pre-industriale a oggi facendo registrare un aumento del 70% dal 1970 al 2004.

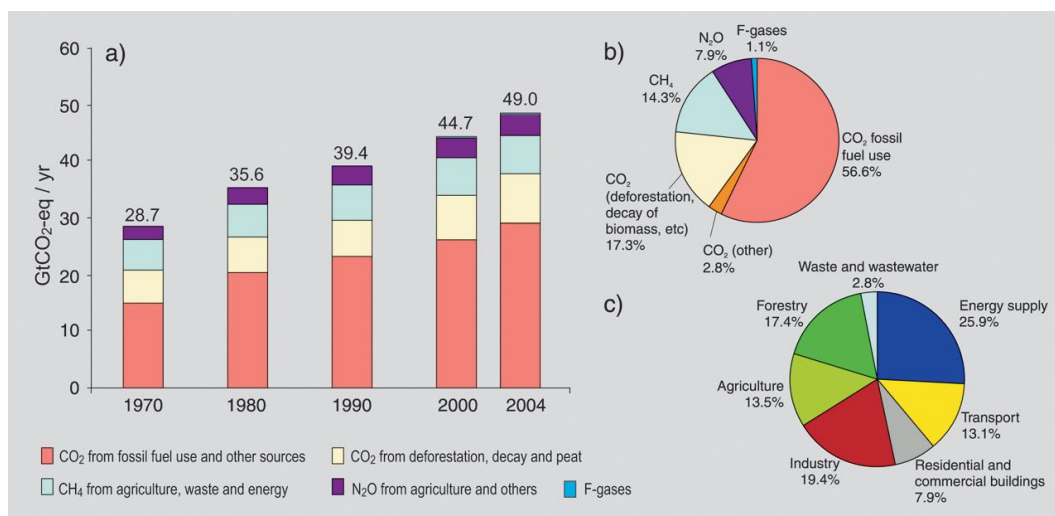


Figura 1.2 - Emissione globale di gas serra e fonti di emissione (IPCC, 2007).

Tra tutti i gas serra probabilmente la CO₂ è il più rilevante in quanto l'incremento della sua concentrazione è responsabile per circa il 50% di quello che viene definito "radiative forcing" totale² (Rodhe, 1990).

Intorno al 1850 la concentrazione atmosferica della CO₂ era di circa 280 ppm, mentre nel 1996 è salita a 365 ppm, con un incremento annuo pari allo 0,5%. Se tale andamento dovesse continuare, la concentrazione di CO₂ nel 21° secolo sarà di 600 ppm (OSTP, 1997). Mahlman (1997) riporta inoltre che un raddoppio della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, rispetto ai livelli registrati nel periodo preindustriale, porterebbe ad una stabilizzazione della temperatura globale con un aumento compreso tra gli 1,5 e 4,5°C. Osservazioni sulle variazioni stagionali della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera mostrano che questa raggiunge il massimo durante i mesi primaverili ed il minimo nei mesi autunnali. Esiste inoltre un gradiente tra l'emisfero nord e quello sud e si ritiene che questo possa essere causato dall'esistenza di "sink" di maggiori dimensioni nell'emisfero nord (Enquete Commission, 1992; Tans *et al.*,1990; Keeling *et al.*,1989).

2 Il radiative forcing viene definito come il peso che un determinato fattore ha nell'alterazione del bilancio energetico dall'atmosfera terrestre ed è quindi un indice dell'importanza che ogni fattore ha nella determinazione del mutamento climatico (IPCC, 2007).

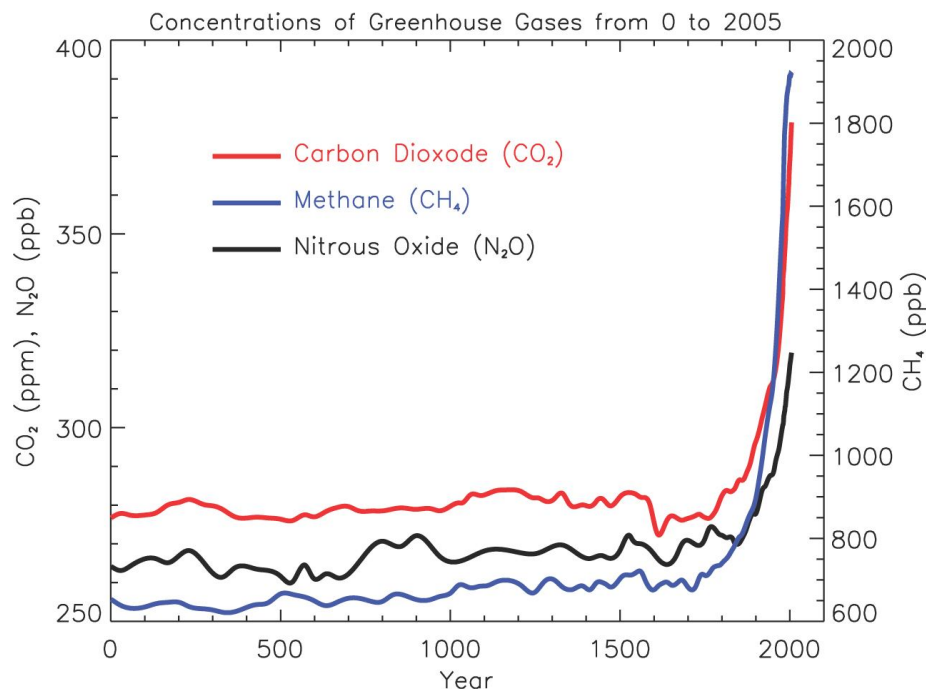


Figura 1.3 - Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂, CH₄ e N₂O negli ultimi 2000 anni (Forster et al., 2007).

Altro gas serra di origine naturale la cui immissione nell'atmosfera è aumentata a causa dell'attività dell'uomo è il metano (CH₄). Nel 1996 la sua concentrazione era pari a circa 1,74 ppmv, quasi il doppio del valore registrato nell'era preindustriale. La concentrazione di CH₄ è aumentata annualmente dell'1% nel periodo che va dal 1960 al 1980 mentre l'attuale tasso di incremento è di circa 0,8% all'anno. È stata riscontrata una pronunciata variazione annuale nella concentrazione di metano con un massimo in primavera ed un minimo in autunno e si ritiene che tali variazioni stagionali siano legate alle fluttuazioni delle emissioni e dell'accumulo nei diversi sink (Lal et al., 1999). Parte delle emissioni di metano sono da attribuire alle attività agricole: ad esempio il settore zootecnico apporta, a causa delle attività metaboliche dei ruminanti, da 30 a 45 litri di metano per kg di sostanza secca consumata (Shibata, 1994); mentre per le risaie l'emissione di metano varia da 0,01 a 1,4 g m⁻² al giorno (Sass, 1994). È da evidenziare che il "radiative forcing" del metano è determinato sia da un effetto diretto che da un effetto indiretto dovuto al ruolo del CH₄ nella formazione fotochimica dell'ozono il quale, a sua volta, influenza la concentrazione di altri gas ad effetto serra. Inoltre l'ossidazione del CH₄ nella stratosfera porta alla formazione di vapore

acquico che ha, a sua volta, un notevole effetto sul riscaldamento globale. Si stima che l'effetto indiretto del metano sia pari a circa 2/3 del suo effetto diretto (Lal *et al.*, 1999).

Altro gas di origine naturale responsabile dell'effetto serra è il protossido di azoto (N_2O). La sua concentrazione attuale è di 311 ppmv ed aumenta ad un ritmo di 0,8 ppmv anno⁻¹. Le fonti e i sink di N_2O non sono però ancora compresi appieno ma si ritiene che l'incremento della sua concentrazione nell'atmosfera sia causato principalmente dalla produzione ed evoluzione di N_2O naturale e/o derivante dalle fertilizzazioni, dalla combustione delle biomasse e dai processi biotici che avvengono nei suoli forestali. Diverse stime mostrano come tra i 0,17 ed i 3,52 kg di N_2O possono essere emessi in atmosfera ogni 100 kg di azoto distribuito attraverso le fertilizzazioni (CAST, 1992).

Il consistente aumento della concentrazione dei gas naturali precedentemente citati è in buona parte attribuibile alle attività dell'uomo e tra quelle che maggiormente contribuiscono al riscaldamento globale possiamo citare sicuramente:

- la combustione di combustibili fossili;
- le attività legate all'industria chimica;
- le attività legate all'agricoltura e i cambiamenti dell'uso del suolo come ad esempio la deforestazione.

La combustione dei combustibili fossili ed i trasporti sono considerati le cause principali del mutamento climatico dato che tali fattori contribuiscono globalmente per circa il 50% al riscaldamento globale con il 40% causato dalla CO_2 ed il restante 10% da CH_4 e O_3 .

Oltre ai gas di origine naturale si hanno anche gas ad effetto serra di origine sintetica. Nel 1980 prodotti chimici come i CFC, alogeni, etc. contribuivano per il 20% al riscaldamento globale ma la concentrazione di tali prodotti, completamente sintetici, è diminuita costantemente dal 1990 a oggi grazie all'adozione di rigide misure di regolamentazione adottate (Lal *et al.*, 1999).

A livello mondiale il settore agricolo contribuisce per circa la metà dell'incremento annuale di gas serra derivanti dall'attività dell'uomo producendo circa il 50% delle emissioni di metano, il 75% delle emissioni di ossido nitroso ed

il 5% delle emissioni antropiche di CO₂ (Cole *et al.*, 1996). Inoltre la deforestazione, cambiamenti nell'uso del suolo e la combustione di biomasse contribuiscono per un ulteriore 14%.

Il radiative forcing delle attività agricole deriva sia da un'azione diretta che indiretta. Gli effetti diretti sono dovuti alla emissione di CO₂, CH₄ e N₂O a causa di:

- ✓ deforestazione;
- ✓ attività metaboliche dei ruminanti;
- ✓ decomposizione del carbonio organico del suolo per via dalle lavorazioni (causa principale dell'emissione di CO₂ dal terreno nelle aree coltivate);
- ✓ coltivazione del riso con metodo di irrigazione per sommersione;
- ✓ distribuzione di fertilizzanti chimici;
- ✓ uso di concimi organici;
- ✓ degradazione delle terre umide.

Gli effetti indiretti derivanti dalle attività agricole includono invece l'emissione di N₂O, NO_x e NH₃ derivanti dall'attività microbica nel suolo e causate dalle irrigazioni effettuate dopo la distribuzione di fertilizzanti sia di origine chimica che di origine organica. È quindi ovvio come l'utilizzo indiscriminato dei fertilizzanti chimici possa aumentare l'emissione di N₂O. Inoltre l'emissione di NO_x ed NH₃ sono responsabili dell'acidificazione del suolo e della eutrofizzazione delle acque. Infine la degradazione degli ecosistemi e del territorio, come ad esempio la diminuzione della qualità del suolo, dell'acqua e della vegetazione, causa una riduzione della produzione di biomassa riducendo di conseguenza la capacità di immobilizzazione di CO₂ da parte del sistema stesso (Lal *et al.*, 1999).

1.1.2 Il contributo delle attività agricole al cambiamento climatico

Da quanto detto precedentemente emerge come anche le attività agricole contribuiscano all'attuale cambiamento climatico dato che sono responsabili dell'emissione di gas come CO₂, CH₄ ed N₂O e la precisa identificazione delle fonti di emissione di gas serra relative alle attività agricole è un elemento importante in quanto solo in questo modo è possibile sviluppare efficaci strategie per la mitigazione del cambiamento climatico.

L'abbondante utilizzo di fertilizzanti è un'ulteriore fonte di emissione di gas serra e, secondo dati FAO (1996), il consumo totale di fertilizzanti è di circa 20 milioni di tonnellate anno⁻¹ e solamente grazie ad un incremento nell'efficienza del loro utilizzo è possibile ottenere una diminuzione delle perdite dovute ad erosione del suolo e alla lisciviazione e volatilizzazione del fertilizzante stesso.

In aggiunta ai fenomeni precedentemente citati, l'agricoltura contribuisce al cambiamento climatico anche andando a modificare l'uso del suolo quando nuove terre vengono convertite alla coltivazione. Infatti una conversione ad uso agricolo di territori occupati da foreste, pascoli o zone umide determina la trasformazione, di questi ecosistemi stabili, in *agroecosistemi* caratterizzati da un utilizzo più o meno intensivo. Tale conversione richiede molteplici lavorazioni o operazioni per la preparazione del terreno, ognuna delle quali è caratterizzata da un proprio impatto ambientale che influisce sui meccanismi che stanno determinando l'attuale cambiamento climatico. Operazioni come il decespugliamento, le lavorazioni del terreno, la sostituzione della vegetazione perenne con colture annuali e le fertilizzazioni, generano un notevole impatto sulle riserve di carbonio presenti nel terreno e sui suoi flussi nel sistema suolo-atmosfera. Quando si verificano tali cambiamenti la maggior parte delle emissioni di CO₂ dal suolo verso l'atmosfera sono da attribuire alla riduzione degli input di carbonio verso il suolo e all'aumento degli elementi antropici che vanno a disturbare le dinamiche che regolano gli equilibri del carbonio nel terreno (Lal *et al.*, 1999).

Diverse ricerche hanno dimostrato come, in seguito al cambiamento dell'uso del suolo, le terre occupate da foreste o da pascoli perdano, nei primi 40-50 anni di coltivazione, dal 20 al 50% del loro contenuto iniziale di carbonio organico (Campbell e Souster, 1982; Tiessen *et al.*, 1982; Mann, 1985, 1986; Schimel,

1986; Johnson e Kern, 1991; Rasmussen e Parton, 1994; Houghton, 1995). Altri lavori hanno invece determinato come le variazioni del contenuto di carbonio organico del terreno, successive al cambio di uso del suolo, avvengano in funzione della nuova gestione ed eventuale erosione del suolo stesso (Rasmussen e Collins, 1991). Inoltre è stato osservato come tali cambiamenti, indotti dalla coltivazione e diversa gestione del suolo, generino principalmente una riduzione della frazione di sostanza organica caratterizzata da un turnover di lunghezza variabile tra i 20 e i 50 anni (Parton *et al.*, 1987; Cambardella e Elliott, 1992).

1.1.3 Ripercussioni sull'attività agricola

Se da un lato le attività agricole sono in parte responsabili dell'emissione di gas serra, dall'altro l'agricoltura stessa è minacciata dall'attuale mutamento climatico dato che, come è noto, l'agricoltura dipende fortemente dal clima. Alcune prove dell'influenza dell'attuale mutamento climatico sull'agricoltura, osservate a livello regionale, venivano riportate già nel terzo rapporto stilato dall'IPCC anche se negli ultimi 40 anni l'incremento rese di molte colture, dovuto principalmente all'incremento della tecnologia al servizio del miglioramento genetico delle specie coltivate, del controllo degli insetti fitofagi, delle malattie e della fertilizzazione, rende difficile identificare i reali effetti del mutamento climatico (Hafner, 2003).

Una prova importante dell'effetto del mutamento climatico sull'attività agricola ed in modo particolare sullo sviluppo delle colture è però fornita dai cambiamenti subiti della fenologia delle piante coltivate. Tali cambiamenti risultano maggiormente visibili, oltre che più facilmente osservabili, nelle colture poliennali, come ad esempio gli alberi da frutto, le quali risultano meno influenzate dalle gestione annuale rispetto alle colture annuali (Rosenzweig *et al.*, 2007). Già nel terzo rapporto dell'IPCC si riportavano prove inerenti i recenti andamenti di alcuni indici agroclimatici ed in modo particolare di quelli che hanno una relazione diretta con la temperatura. Sono un esempio l'allungamento della stagione di crescita e l'incremento dei gradi giorno accumulati dalle colture

durante tutto il loro ciclo. Tali incrementi sono evidenti nelle regioni temperate dell'Eurasia (Moonen *et al.*, 2002; Menzel *et al.*, 2003; Genovese *et al.*, 2005; Semenov *et al.*, 2006) ed in gran parte del nord America (Robeson, 2002; Feng e Hu, 2004). Nelle regioni del Sahel l'aumento delle temperature in combinazione con la diminuzione delle precipitazioni ha causato una riduzione della lunghezza del periodo vegetativo non permettendo alle specie vegetali presenti di completare il loro naturale ciclo biologico (Ben Mohamed *et al.*, 2002).

Altre ricerche hanno mostrato come in Asia le variazioni delle produzioni non possano essere invece direttamente attribuibili al cambiamento climatico. Tali ricerche hanno messo in evidenza come la produzione di riso in India per il periodo che va dal 1950 al 1999 sia passata da 20 Mt a oltre 90 Mt mostrando solamente una lieve diminuzione in concomitanza della riduzione delle precipitazioni nella stagione dei monsoni negli anni in cui si è verificato "El Nino" (Selvaraju, 2003). Effetto negativo dell'innalzamento delle temperature è stato però osservato dall'International Rice Research Institute nelle Filippine dove è stata registrata una riduzione nella resa paria al 15% per ogni grado centigrado di aumento della temperatura minima durante il periodo di crescita nella stagione asciutta (Peng *et al.*, 2004). Quest'ultima considerazione è però legata a osservazioni locali ed effettuate per un breve arco di tempo. Un risultato simile è stato comunque ottenuto anche per la produzione di fieno in Inghilterra dove si è stimata una riduzione di 0,33 t ha⁻¹ per ogni grado centigrado di incremento della temperatura dei mesi di luglio e agosto (Cannell *et al.*, 1999 IPCC).

Nel settimo rapporto dell'European Environment Agency (EEA, 2005) si riporta come gli effetti del cambiamento climatico in Europa possano essere sostanziali in modo particolare nelle regioni del sud e centro Europa, zone dove l'agricoltura rappresenta un settore di grande importanza. Infatti, mentre i sistemi agricoli intensivi dell'Europa occidentale mostrano una bassa suscettibilità, le zone agricole del sud sono maggiormente vulnerabili agli impatti, sia diretti che indiretti, dell'attuale mutamento climatico. Secondo alcuni studi (Stuczynski *et al.*, 2000) l'aumento delle temperature e della siccità nelle regioni mediterranee ed in parte dell'Europa dell'est, potrebbero portare a una riduzione delle rese; Bindi e Moriondo (2005) riportano come, in base agli scenari di emissione dei gas serra

A2 e B2 proposti dall'IPCC, ci si possa aspettare una riduzione delle rese per le specie coltivate nelle regioni appartenenti al bacino del Mediterraneo a partire dal 2050. Simili riduzioni delle rese sono state previste anche per le regioni dell'Europa dell'est per le quali si suppone inoltre un incremento della variabilità delle rese (Maracchi *et al.*, 2004). Ci si aspetta infine che tali riduzioni siano maggiori nelle regioni meridionali rispetto a quelle più a nord anche nel caso in cui si dovesse prendere in considerazione l'effetto fertilizzante determinato dall'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera.

Anche il comparto zootecnico può essere influenzato dal cambiamento del clima e dall'aumento della concentrazione della CO₂ nell'atmosfera. Infatti tali cambiamenti possono influire direttamente sull'allevamento andando ad incidere sulla salute degli animali, sul loro accrescimento e sulla riproduzione o, indirettamente, causando variazioni nella disponibilità di alimenti per il bestiame (Parry, 2000).

Anche l'IPCC nel suo ultimo rapporto dichiara che nell'area europea il cambiamento climatico e l'incremento della concentrazione atmosferica della CO₂ possa avere ripercussioni differenti, in alcuni casi positive, sul comparto agricolo portando ad esempio ad un leggero aumento delle produzioni. Per il frumento si è stimato un incremento delle rese, a partire dal 2050, variabile tra il 37% (considerando lo scenario B2) ed il 101% (scenario A1) (Ewert *et al.*, 2005). Tale aumento delle rese dovuto principalmente al mutamento climatico è atteso principalmente nelle zone del nord Europa dove gli incrementi di produzione per il frumento sono stimati da altri studiosi tra il 2 e 9% a partire dal 2020, tra l'8 e il 25% dal 2050 e tra il 10 ed il 30% dal 2080 (Alexandrov *et al.*, 2002; Ewert *et al.*, 2005; Audsley *et al.*, 2006; Olesen *et al.*, 2007). Anche per l'IPCC le maggiori riduzioni delle rese sono invece attese nelle regioni del bacino del Mediterraneo, nel sud ovest dei Balcani e nelle zone del sud ovest della Russia (Olesen e Bindi, 2002; Alcamo *et al.*, 2005; Maracchi *et al.*, 2005). Sempre in ambito europeo, nelle regioni più meridionali è prevista, a partire dal 2050, una generale variazione delle rese (ad esempio da -30 a +5% per i legumi, da -12 a +3% per il girasole) ed un aumento delle richieste idriche (mais da +2 a +4%, patata da +6 a +10%) da parte delle colture coltivate nel periodo primaverile (Giannokopoulos *et al.*, 2005;

Audsley *et al.*, 2006). L'impatto sulle colture autunno-vernine è invece variabile: ci si aspetta infatti una forte diminuzione delle rese nelle aree di coltivazione più meridionali, mentre un aumento si potrebbe verificare nelle zone più a nord o più fredde (Santos *et al.*, 2002; Giannakopoulos *et al.*, 2005; Audsley *et al.*, 2006; Olesen *et al.*, 2007). Inoltre si prevede che alcune colture tipiche delle zone del sud Europa (es. mais, girasole e soia) in futuro potranno essere coltivate in zone più a nord o ad altitudini maggiori nelle attuali zone di coltivazione (Audsley *et al.*, 2006). A conferma di ciò diversi studi hanno mostrato come, in base ad alcuni scenari tra quelli proposti dall'IPCC, l'area Europea adatta alla coltivazione del mais possa subire un ampliamento variabile tra il 30 ed il 50% alla fine del 21° secolo (Hildén *et al.*, 2005; Olesen *et al.*, 2007).

Sempre per le regioni europee che si affacciano sul Mare Mediterraneo l'aumento della frequenza di eventi climatici estremi durante alcune fasi fenologiche particolarmente importanti (ad esempio temperature particolarmente elevate durante la fioritura), eventi piovosi particolarmente intensi o periodi di siccità potrebbero, verosimilmente, ridurre le rese di colture estive come il girasole (Alcamo *et al.*, 2007).

1.2 CAMBIAMENTI CLIMATICI: MITIGAZIONE E ADATTAMENTO

Nel suo terzo rapporto l'IPCC definisce il concetto di **mitigazione** come un intervento dell'uomo per ridurre le emissioni dei gas serra o aumentare l'entità dei loro sink. Con il termine **adattamento** si faceva invece riferimento ad un adattamento, da parte di un sistema naturale o meno, agli effetti di elementi climatici in modo tale da ridurre l'entità dei danni subiti o ottenerne dei benefici (Klein *et al.*, 2007).

Da tali definizioni emerge come la mitigazione vada a diminuire sia gli effetti positivi che quelli negativi del cambiamento climatico, mentre l'adattamento è "selettivo" in quanto permette di sfruttare i vantaggi del mutamento climatico riducendone al tempo stesso gli effetti negativi (Goklany, 2005).

1.2.1 Mitigazione

La maggior parte degli studi effettuati sulla mitigazione del mutamento climatico tramite l'attuazione di determinate attività agricole sono stati indirizzati prevalentemente all'immobilizzazione del carbonio nel suolo.

Già nel secondo rapporto dell'IPCC si dichiarava però che le tecniche per la riduzione delle emissioni dei gas serra non verrebbero adottate dagli agricoltori se queste non portassero anche ad un aumento della redditività. In base a tale principio le opzioni per la mitigazione del cambiamento climatico in grado sia di diminuire l'emissione dei gas serra che di aumentare le produzioni, sarebbero più facilmente adottate dagli agricoltori rispetto a quelle mirate esclusivamente alla riduzione delle emissioni.

Le tecniche per la mitigazione del cambiamento climatico rientrano, secondo l'IPCC, in tre tipologie di interventi: la riduzione delle emissioni di gas serra, la loro rimozione dall'atmosfera ed evitare la loro immissione in atmosfera (Smith *et al.*, 2007).

La *riduzione* delle emissioni derivanti dalle attività agricole si basa sul miglioramento della gestione del carbonio e dell'azoto negli agroecosistemi. Sono un esempio tutte le tecniche che consentono un maggior assorbimento, da parte delle piante, dei fertilizzanti azotati distribuiti determinando di conseguenza una riduzione delle emissioni di N₂O (Bouwman, 2001).

Le tecniche di *rimozione* dei gas serra dall'atmosfera puntano all'accumulo della CO₂ nel terreno il quale rappresenta una grande riserva di carbonio in forma di sostanza organica. Sono considerate tecniche di mitigazione attraverso la rimozione dei gas serra tutte quelle pratiche agricole che permettono di accumulare carbonio nel terreno sfruttando l'attività fotosintetica delle piante e/o che rallentino la trasformazione in CO₂ del carbonio immobilizzato nel terreno dovuto a fenomeni come la respirazione, l'erosione o la combustione (Smith *et al.*, 2007). Molti studi hanno dimostrato come l'adozione di appropriate tecniche agronomiche, individuate in funzione delle condizioni locali, possa consentire l'accumulo di grandi quantità di carbonio nel terreno (Lal, 2004). Inoltre una quantità significativa di carbonio può essere accumulata, dai sistemi agroforestali, nei tessuti vegetali delle piante (Albrecht e Kandji, 2003).

Le tecniche che puntano all'*eliminazione* delle emissioni di gas serra in ambito agricolo prevedono ad esempio l'utilizzo di colture, o residui colturali, per la produzione di carburanti, sia con un loro utilizzo diretto che dopo la loro conversione in etanolo o biodiesel (Schneider e McCarl, 2003; Cannell, 2003). In questo modo si eviterebbe l'immissione in atmosfera di gas serra derivanti dalla combustione di combustibili fossili, ma verrebbero bruciati dei combustibili derivanti dalla trasformazione di materiale vegetale il quale è stato ottenuto grazie alla sottrazione di CO₂ dall'atmosfera.

In ambito agricolo sono quindi molteplici le tecniche adottabili per la mitigazione del cambiamento climatico. In generale tutte le tecniche agronomiche che permettono un aumento della resa e un maggior input di carbonio possono portare ad un aumento del suo accumulo nel suolo (Follett, 2001). Esempi sono l'utilizzo di varietà migliorate che permettono di ottenere maggiori produzioni, l'adozione delle rotazioni delle colture in modo particolare con specie perenni che dislocano maggiori quantità di carbonio nel sottosuolo, ed evitare la non coltivazione delle terre (West e Post, 2002; Smith, 2004a, b; Lal, 2003, 2004; Freibauer *et al.*, 2004). Un ulteriore esempio è l'adozione di rotazioni nelle quali è previsto l'utilizzo di specie leguminose (West e Post, 2002; Izaurrealde *et al.*, 2001) che permettono di ridurre la quantità di azoto da apportare mediante le fertilizzazioni, alle colture in successione. Altra tecnica è quella che prevede la presenza di "cover-crops" tra i filari delle colture arboree o dei vigneti in quanto queste colture permettono di incrementare ulteriormente la quantità di carbonio che può essere immobilizzata nel terreno (Barthès *et al.*, 2004; Freibauer *et al.*, 2004).

Altre tecniche relative alla mitigazione prevedono un'accurata scelta delle lavorazioni del terreno e una attenta gestione dei residui colturali. Ad esempio per molte colture è possibile adottare tecniche di "minima lavorazione" o di "non lavorazione"; tali tecniche permettono, in alcuni casi, di aumentare la quantità di carbonio immagazzinata nel terreno (West e Post, 2002; Ogle *et al.*, 2005; Gregorich *et al.*, 2005; Alvarez 2005) dato che ogni interferenza nel sistema suolo, determinata dalle lavorazioni, tende a favorire la perdita di carbonio attraverso i fenomeni di decomposizione ed erosione (Madari *et al.*, 2005). Inoltre l'adozione della non lavorazione permette un'ulteriore riduzione nell'emissione di

CO₂ grazie al risparmio energetico dovuto al minor numero di lavorazioni effettuate (Marland *et al.*, 2003b; Koga *et al.*, 2006).

Spesso però uno dei metodi più efficaci nel ridurre le emissioni è la conversione delle terre destinate all'uso agricolo ad un uso alternativo o la loro riconversione allo stato originario. Tale conversione potrebbe interessare intere aree agricole o potrebbe limitarsi esclusivamente a piccole zone come ad esempio i margini dei campi coltivati (Follett, 2001; Freibauer *et al.*, 2004; Lal, 2004b; Falloon *et al.*, 2004; Ogle *et al.*, 2003). A titolo di esempio la conversione di un terreno arato in pascolo comporta un accumulo di carbonio nel suolo grazie alla riduzione del disturbo causato dalle lavorazioni e per la riduzione dell'asportazione di carbonio derivante dalla raccolta del prodotto (Smith *et al.*, 2007).

Anche il pascolamento può influire sull'emissione di gas serra dato che l'intensità e la frequenza di tale attività possono influenzare sia la rimozione che l'aumento del carbonio stoccato nel sistema oltre a modificare la composizione floristica del pascolo stesso influenzando di conseguenza la quantità di carbonio che può essere immobilizzato nel suolo (Conant *et al.*, 2001, 2005; Freibauer *et al.*, 2004; Conant e Paustian, 2002; Reeder *et al.*, 2004). Come conseguenza si può verificare che l'accumulo di carbonio in un pascolo gestito in maniera ottimale sia spesso maggiore di quanto si registri in un pascolo non utilizzato o sovra pascolato (Liebig *et al.*, 2005; Rice e Owensby, 2001).

1.2.2 Adattamento

Le forme di adattamento possono essere distinte in due tipologie:

- adattamento congiunturale che prevede la modifica delle pratiche agronomiche mantenendo però invariate le colture. Prevede quindi interventi sui periodi di semina e di raccolta (Olesen *et al.*, 2007), sui momenti in cui vengono effettuate le lavorazioni, sulla frequenza con cui si fa ricorso ai trattamenti antiparassitari o fertilizzanti e sulla loro tipologia;

- adattamento strutturale che prevede la sostanziale modifica degli ordinamenti colturali portando quindi all'abbandono di alcune coltivazioni in favore di altre. In questa tipologia di adattamento rientrano appunto la sostituzione di alcune specie attualmente coltivate (Mínguez *et al.*, 2007) e l'adozione di nuove varietà che si adattino meglio alle mutate condizioni ambientali (Richter e Semenov, 2005).

Inoltre nel lungo periodo si può ipotizzare anche lo spostamento delle aree agricole verso nuove aree in funzione della mutata idoneità alla coltivazione (Alcamo *et al.*, 2007).

Alcuni studi hanno dimostrato che in ambito agricolo, considerando alcuni dei differenti scenari proposti dall'IPCC, differenti tecniche di adattamento come: intensificazione, estensivizzazione e abbandono potrebbero essere adottate con successo in differenti zone europee. È inoltre indiscutibile che la riforma delle politiche agricole dell'Unione Europea ha l'obiettivo di favorire l'adattamento al cambiamento climatico (Olesen e Bindi, 2002) e diminuire la vulnerabilità del settore agricolo (Metzger *et al.*, 2006). Notevoli sono le strategie di adattamento ma per far sì che si abbia una riduzione della vulnerabilità al cambiamento del clima è necessaria una loro adozione su ampia scala.

Studi recenti hanno inoltre confermato quanto dichiarato nel terzo rapporto dell'IPCC affermando che le opzioni di adattamento avrebbero ricadute benefiche ma limiti di tipo finanziario, tecnologico, politico, sociale e culturale potrebbero limitare l'efficacia. Inoltre anche società con una elevata capacità di adattamento rimangono vulnerabili al cambiamento del clima e ad eventi estremi come dimostrato ad esempio dall'ondata di caldo anomalo verificatasi nel 2003 che causò numerose morti in diverse città europee e dai danni causati negli Stati Uniti dall'uragano "Katrina" (IPCC, 2007).

1.3 LA SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO

La frazione organica del suolo è estremamente eterogenea e normalmente viene 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.

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 derivano dalla degradazione stessa dei residui vegetali.

Gli apporti di carbonio organico al suolo sono legati alla fase finale del catabolismo o all'abbandono di spoglie degli organismi viventi e, per il bilancio

del carbonio nel suolo, gli apporti 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 vari (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.

I processi di degradazione portano alla riduzione dei materiali organici arrivati al terreno in molecole di piccole dimensioni e la velocità con la quale avviene la degradazione dei diversi materiali organici è strettamente legata alle caratteristiche fisiche e chimiche dei suoi costituenti. Processi di degradazione sono condotti dapprima dalla pedofauna attraverso la triturazione e l'amminutamento dei residui e successivamente dalla microfauna del suolo. Anche le condizioni ambientali sono determinanti nel processo della degradazione e le condizioni ossidoriduttive del suolo rappresentano l'influenza principale su tale processo. In caso di aerobiosi la degradazione conduce alla prevalente formazione di CO₂, energia e cellule microbiche; mentre in condizioni di anaerobiosi si avviano processi fermentativi che bloccano la degradazione a stadi intermedi delle ossidazioni, con produzione di metano e ridotta formazione di cellule microbiche e di energia.

Nel terreno il turnover della sostanza organica è rappresentato dalla velocità di riciclaggio del carbonio organico e fornisce un'indicazione del periodo di permanenza di quest'ultimo nel suolo e rappresenta un dato molto importante ai

fini pratici in quanto consente di valutare l'effetto di diversi fattori, quali ad esempio le pratiche agronomiche, sulla quantità di s.o. presente nel suolo.

Una volta giunta al terreno la s.o. tende ad evolvere verso la mineralizzazione e la velocità con cui avviene tale processo è influenzata da diversi fattori come:

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

Il tipo di s.o. di partenza dipende sostanzialmente dal tipo di vegetazione che va a determinare sia la quantità di biomassa prodotta che la sua composizione. Questi fattori a loro volta vanno ad influire sulla tipologia e sull'attività della microflora e della microfauna presente nel terreno.

Il tipo di suolo ha invece un ruolo fondamentale in relazione alla tessitura, al pH e al rapporto aria/acqua contenuta.

Dal punto di vista climatico i fattori che maggiormente vanno ad influire sul turnover del carbonio nel suolo sono la piovosità e la temperatura. Questi intervengono nel determinare il tipo di s.o. e la quantità prodotta annualmente orientando inoltre la sua evoluzione nel terreno; ad esempio una rapida mineralizzazione della s.o. è favorita da temperature elevate e mancanza di precipitazioni.

Per quanto riguarda le attività antropiche, il sistema colturale adottato e la sua gestione giocano un ruolo molto importante sulle scorte di carbonio del suolo (Sequi, 1989).

1.3.1 Capacità di accumulo di carbonio nel suolo

La pedosfera gioca un ruolo fondamentale nel ciclo del carbonio ed oggi assume un ruolo fondamentale dato che numerose ricerche hanno indicato che l'immobilizzazione del carbonio nel terreno come sostanza organica può

contribuire ad attenuare l'incremento della concentrazione atmosferica della CO₂ (Cole *et al.*, 1996; Lal *et al.*, 1999; Allmaras *et al.*, 2000; Smith *et al.*, 2000).

Nel suolo il contenuto di carbonio organico è il risultato dell'equilibrio tra molteplici processi che ne determinano l'emissione e l'immobilizzazione. I processi che portano all'immobilizzazione del carbonio sono differenti e comprendono: l'umificazione, l'aggregazione e la traslocazione all'interno del terreno stesso, l'approfondimento radicale e la calcificazione. Quest'ultimo processo implica la formazione, attraverso processi abiotici, di carbonati ed altri composti solidi insolubili contenenti carbonio inorganico ed è estremamente importante nelle regioni aride e semi-aride. Al contrario l'emissione di carbonio dal suolo viene accentuata da fenomeni come l'erosione, la lisciviazione, la metanogenesi, la volatilizzazione e la mineralizzazione (Lal *et al.*, 1999). In un ecosistema indisturbato la quantità di carbonio presente nel terreno riflette la capacità dell'ecosistema stesso di immobilizzare il carbonio e permette una corretta quantificazione del carbonio presente in ecosistemi simili prima del manifestarsi di una perturbazione esterna (Zhang *et al.*, 2007).

L'immobilizzazione del carbonio nel suolo è generalmente misurata come carbonio totale stoccato nel terreno. La quantità di carbonio e per quanto tempo questo carbonio può essere immobilizzato nel terreno dipende dai pool della sostanza organica presenti (active vs. passive), dal loro turnover (Six *et al.*, 2001; Gleixner *et al.*, 2002), dalla forma di stabilizzazione (chimica o fisica) (Kaiser *et al.*, 2002) e dalla posizione della sostanza organica all'interno della struttura del terreno (inter/intra-aggregati vs. forme libere) (Balesdent *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2001).

Proprio l'attività agricola dovrebbe contribuire all'accumulo di carbonio nel suolo grazie all'adozione di forme di gestione ed uso del suolo che favoriscano l'immobilizzazione del carbonio nel terreno e/o diminuiscano le emissioni di gas serra dal suolo. Per raggiungere tale obiettivo è di fondamentale importanza l'aumento ed il mantenimento della qualità del suolo che Doran e Parkin (1994) definiscono come: «la capacità del suolo di sostenere la produttività, mantenere la qualità dell'ambiente e promuovere il benessere delle piante e degli animali all'interno degli ecosistemi». A ribadire l'importanza della qualità del suolo nei

confronti del cambiamento climatico alcune ricerche confermano come esista una stretta relazione sia tra la qualità del suolo e l'immobilizzazione di carbonio, che tra la qualità del suolo e l'effetto serra (Bezdicsek *et al.*, 1996). Questo è dovuto al fatto che all'aumentare della qualità del suolo aumenta l'immobilizzazione di carbonio nel suolo stesso con un conseguente effetto positivo sulla riduzione dell'effetto serra.

Importanti indicatori della qualità del suolo in relazione all'immobilizzazione del carbonio sono il contenuto di carbonio in forma organica (SOC) ed in forma inorganica (SIC), l'aggregazione, la capacità di campo, la capacità di scambio cationico, la conducibilità elettrica, la densità apparente e la biodiversità del suolo. L'importanza di questi indicatori varia in funzione del tipo di suolo considerato e di conseguenza per poter effettuare studi approfonditi sulla qualità del suolo sono necessarie informazioni sito-specifiche (Lal *et al.*, 1999). Numerose sono le ricerche che confermano quanto detto; alcune di queste hanno evidenziato come sia la qualità del suolo che la struttura del suolo siano fortemente correlati al contenuto di carbonio organico presente nel terreno (Beare *et al.*, 1994; Tisdall, 1996; Angers e Carter, 1996); in altre (Hudson, 1994) si riporta il fatto che esista una forte correlazione positiva tra il contenuto di carbonio organico del terreno e la capacità di campo, mentre esiste una relazione negativa tra il contenuto di carbonio e la densità apparente del suolo. Unger (1995 a, b) ha osservato un miglioramento delle condizioni della superficie del suolo in seguito all'aumento del contenuto di carbonio organico nel suolo stesso. Inoltre il miglioramento della qualità del terreno, determinato dall'aumento del contenuto di sostanza organica, porta ad un incremento della produzione di biomassa che, a sua volta, determina un ulteriore arricchimento del contenuto di carbonio organico (Lal *et al.*, 1999).

La totalità della sostanza organica che giunge al suolo è formata da una miscela eterogenea di elementi organici come ad esempio residui colturali o deiezioni animali che presentano caratteristiche chimico-fisiche e velocità di decomposizione differenti a seconda del tipo di vegetazione, del clima, delle proprietà del suolo e dell'uso che ne viene fatto da parte dell'uomo.

L'IPCC stima che le terre destinate all'utilizzo agricolo permetterebbero di immobilizzare tra le 400 e le 800 Mt anno⁻¹ di carbonio (corrispondenti a circa

1400-2900 Mt anno⁻¹ di CO₂ equivalenti) giungendo alla saturazione dopo 50-100 anni (IPCC, 1996). Studi precedenti hanno invece stimato che nel suolo, a livello mondiale, sono stoccati da 1400 a 1600 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g) di carbonio sotto forma di sostanza organica. Tale quantitativo corrisponde a circa tre volte la quantità di biomassa epigea totale ed è approssimativamente il doppio della quantità di carbonio presente in atmosfera (Post *et al.*, 1982; Eswaran *et al.*, 1993).

1.4 I MODELLI DI SIMULAZIONE

I modelli di simulazione sono strumenti utilizzati per riprodurre l'andamento temporale delle caratteristiche osservabili di un processo che si intende studiare. Inizialmente questi modelli sono stati sviluppati in ambito ingegneristico impiegando diversi dispositivi analogici e successivamente hanno subito un impulso decisivo con l'impiego di dispositivi informatici. Macchine di calcolo sempre più potenti hanno reso possibile la traduzione in linguaggio macchina di equazioni ed algoritmi matematici sempre più complessi e hanno permesso di effettuare simulazioni sempre più confrontabili con la realtà osservata. Negli anni Settanta non ci si è più accontentati di simulare processi avvenuti nel tempo passato e si è iniziato ad utilizzare i modelli di simulazione sul tempo futuro ottenendo in tal modo delle "proiezioni". In molti casi le proiezioni dei modelli di simulazione sono risultate (e risultano) così vicine alla realtà che essi sono spesso considerati (impropriamente) modelli previsionali.

Tra le attività umane l'agricoltura è tra quelle che ha più bisogno di previsioni o proiezioni. La resa delle colture agrarie dipende da molti fattori climatici (gelate, grandine, siccità, ecc.) ed ecologici (malattie, parassiti, malerbe, inquinamento ecc.) sui quali è spesso possibile intervenire con successo se noti in anticipo. In generale la previsione dei fattori climatici si basa sulle leggi della fisica e su misure strumentali, mentre la simulazione dei processi ecologici si basa su relazioni, osservazioni qualitative e conteggi. In biologia non esistono leggi universali come nella fisica, pertanto, mentre si può parlare di previsioni per i fattori climatici, si deve parlare di proiezioni per i fattori ecologici. Tuttavia, i modelli di simulazione dei processi ecologici hanno permesso di comprendere meglio i meccanismi di funzionamento degli ecosistemi agro-forestali e le loro proiezioni verso il tempo futuro di ridurre l'impatto dei fattori ecologici negativi.

1.4.1 Principi e funzionamento dei modelli di simulazione

I modelli di simulazione, oggi utilizzati in moltissimi settori delle scienze dell'ambiente, sono generalmente una rappresentazione, con differenti livelli di complessità, delle dinamiche e delle interazioni nel sistema acqua-suolo-pianta-atmosfera, e hanno lo scopo di migliorarne la gestione e di comprenderne più a fondo la complessità che lo caratterizza (Severini e Gilioli, 2002).

La rappresentazione del sistema in forma di relazione matematica richiede la formulazione di un modello matematico; se le variabili del sistema considerato e le relative relazioni di interdipendenza sono numerose, la rappresentazione del sistema richiede un modello matematico complesso.

Con il termine *simulazione* si intende la fase di studio del sistema attraverso l'utilizzo di un modello. Le fasi principali del processo di modellazione sono:

1. formulazione concettuale;
2. calibrazione;
3. validazione.

Attraverso la *formulazione concettuale* si scelgono i parametri e gli algoritmi ritenuti in grado di rappresentare il fenomeno o parti di esso.

Attraverso la *calibrazione* si adattano, sulla base di confronti fra risultati sperimentali e risultati forniti dalle proiezioni del modello, i parametri che fanno parte del modello di simulazione in modo da migliorarne la capacità di descrivere correttamente il funzionamento del sistema.

Infine con la *validazione*, il modello calibrato viene utilizzato in situazioni reali per verificarne l'attendibilità delle previsioni (corrispondenza fra risultati delle simulazioni e risultati ottenuti in campo).

A partire dagli anni novanta, il ricorso ai modelli è diventato molto frequente anche negli studi agronomici dove, al pari di altri settori, si sfruttano le possibilità offerte dai calcolatori elettronici. Sono considerati uno strumento potenzialmente utile per la gestione agronomica aziendale, per la previsione quantitativa dei raccolti, per la stima della generazione di inquinanti, e quindi anche per la programmazione economica e territoriale. E' importante sottolineare che essi

tendono, in alcune circostanze, a semplificare troppo l'interpretazione di fenomeni molto complessi come quelli che determinano la produzione vegetale agraria; questi fenomeni, infatti, sono regolati da numerosi fattori non sempre ben definibili e caratterizzati da funzioni specifiche il cui peso non è sempre facile da quantificare. Come conseguenza la loro applicazione generalizzata può anche portare a risultati poco affidabili, per questo è fondamentale, oltre all'eventuale affinamento degli algoritmi che li costituiscono, una accurata opera di calibrazione e validazione. In agricoltura i campi di applicazione più frequenti sono tre, quello che si interessa in prevalenza della coltura, quello relativo alle problematiche ambientali e quello inerente la gestione dei processi di settore (Giardini, 2002).

Una caratteristica comune a tutti i modelli di simulazione è la loro struttura in *moduli o submodelli* ognuno dei quali contiene le informazioni e gli algoritmi necessari alla simulazione di differenti "comparti" del sistema che si vuole simulare e che permettono la modellazione degli scambi di energia e materia tra comparti tra loro contigui. Solitamente è presente un modulo suolo, nel quale vengono descritti i movimenti di flusso idrico in funzione delle caratteristiche fisiche del suolo, un modulo pianta, che considera l'accrescimento e la gestione della coltura nelle sue varie fasi fenologiche, e un modulo di dinamiche dei nutrienti (o di contaminanti, inquinanti etc., a seconda dei casi) che modella gli input, il trasporto, l'assorbimento, l'accumulo, la lisciviazione e le altre dinamiche cui specifici elementi nutritivi sono soggetti. A questi si può aggiungere un modulo climatico, dove vengono specificate e definite le variabili meteorologiche che rappresentano il motore di tutto il sistema (Ungaro, 1997).

Recentemente il numero dei modelli di simulazione è cresciuto notevolmente grazie alla creazione di modelli per la descrizione dei processi idrologici dei suoli e della crescita delle colture. Ulteriore esempio sono i modelli per le simulazioni produttive delle colture ed i modelli che simulano interazioni complesse in ambito agricolo.

I modelli per la simulazione delle produzioni delle colture simulano l'accrescimento e lo sviluppo di una determinata coltura e ne stimano la capacità produttiva nelle condizioni ambientali e agronomiche considerate. Questi

generalmente sono formati da tre moduli:

1. il modulo climatico che contiene ed elabora le informazioni di tipo meteorologico fornite al modello;
2. il modulo del terreno che richiede informazioni pedologiche e utilizza algoritmi appositi per la stima del bilancio idrico, per la simulazione dell'accrescimento dell'apparato radicale e per la stima della disponibilità di alcuni elementi nutritivi;
3. il modulo coltura, in cui vengono modellizzati tutti i processi di base responsabili dell'accrescimento, dello sviluppo e della produzione delle colture.

A tale tipologia di modelli appartengono il gruppo di modelli CERES, che simulano lo sviluppo e la produzione di mais, frumento e sorgo, e il modello SOYGRO, che simula lo sviluppo e la produzione della soia.

I modelli per la simulazione di interazioni complesse in ambito agricolo simulano invece le varie fasi del processo produttivo in campo, avendo come obiettivo non solo la stima delle produzioni ma anche quello di fornire delle proiezioni sull'erosione e sul rilascio di inquinanti nell'aria e nell'acqua. Anche questa tipologia di modelli è formata da diversi moduli, il cui numero varia in base al tipo di modello e ai processi che esso simula. I più frequenti sono:

1. il modulo climatico in cui sono richiesti i dati meteo che possono essere a scala oraria, giornaliera o mensile. In quest'ultimo caso, attraverso degli algoritmi speciali, i dati mensili vengono rielaborati per l'ottenimento dei dati giornalieri. In questo modulo può essere contenuto anche un simulatore climatico, ovvero un programma in grado di generare un nuovo clima, ciò è importante in quelle aree per le quali non si dispone di dati meteorologici;
2. il modulo idrologico che simula i processi di ruscellamento, evapotraspirazione, percolazione, drenaggio e irrigazione;
3. il modulo erosivo che calcola le diverse tipologie di erosione;
4. il modulo dei nutrienti che solitamente considera, l'azoto e il fosforo;
5. il modulo fitofarmaci che permette di stimare le perdite per percolazione e scorrimento dei presidi sanitari impiegati in campo;

6. il modulo delle lavorazioni che permette di simulare l'effetto che esse hanno sul rimescolamento dei diversi orizzonti del terreno ed in particolare sui residui colturali, sui nutrienti e sui fitofarmaci;
7. il modulo colturale consente di simulare il comportamento delle colture e di calcolare l'effetto della copertura vegetale sui bilanci idrico e dei nutrienti.

Alcuni modelli, che simulano interazioni complesse in ambito agricolo, sono molto noti, tra questi si possono citare ad esempio CROPSYST, EPIC, CREAMS e GLEAMS.

Ulteriori distinzioni possono essere fatte per i modelli di simulazione. Possiamo infatti distinguere *modelli deterministici* e *modelli stocastici*. I primi presumono che un sistema o un processo operi in modo tale che il verificarsi a monte di una serie di condizioni ed eventi comporti un risultato univocamente definibile e senza fornire nessuna misura della distribuzione probabilistica di quel risultato; i secondi presuppongono un grado di incertezza più o meno ampio insito nella risposta del sistema e quindi sono strutturati in modo da rendere conto di tale incertezza. Inoltre è possibile dividere i modelli in *modelli empirici* e *modelli meccanicistici*. I primi sono descrizioni dirette dei dati osservati e sono generalmente definiti stimando i parametri di una regressione multipla, vengono realizzati con lo scopo di descrivere il comportamento di un sistema e di dimostrare l'esistenza di relazioni tra le variabili selezionate ma senza spiegarne la natura. I modelli meccanicistici tentano invece di spiegare le relazioni tra gli elementi del sistema modellato (Donatelli, 1995).

1.4.2 Modellizzazione dell'accumulo di carbonio nel suolo

La decomposizione della sostanza organica presente nel suolo è un processo complesso che coinvolge molteplici interazioni biologiche dovute alle attività enzimatiche necessarie per la decomposizione stessa. Allo stesso tempo è semplice però fare una divisione concettuale delle differenti frazioni della

sostanza organica presente nel terreno in funzione della velocità con la quale esse vengono degradate. Ad esempio le stoppie si degradano velocemente una volta incorporate nel terreno mentre l'humus, che conferisce una fertilità intrinseca al suolo, si degrada lentamente. Possiamo assumere che altre frazioni, caratterizzate da differenti velocità di degradazione, siano presenti nel terreno e che tra di loro si verifichino scambi di materia (Molina *et al.*, 1994).

L'abbondanza e la reattività di ogni singola frazione determina il suo contributo al tasso di mineralizzazione totale; frazioni di grandi dimensioni e relativamente stabili, con una bassa reattività, portano ad una lenta mineralizzazione mentre l'incorporazione nel terreno di piccole quantità di substrati caratterizzati da una elevata degradabilità origina dei picchi nell'attività di mineralizzazione.

Oggi sono molteplici i software in grado di effettuare la simulazione della dinamica del carbonio nel terreno, sono un esempio: CENTURY (Parton *et al.*, 1986), CropSyst (Stockle, 2003), DSSAT (Jones *et al.*, 2003) ed EPIC (Williams *et al.*, 1983).

Il concetto che sta alla base dei modelli che simulano la mineralizzazione della sostanza organica è che il processo di mineralizzazione del carbonio avviene in differenti frazioni (pool) distinte tra loro dal punto di vista qualitativo e quantitativo e la velocità con la quale avviene tale processo varia in funzione della loro composizione chimica la quale determina, ad esempio, la degradabilità della sostanza organica stessa. In linea generale tutti i modelli di simulazione rappresentano la dinamica del carbonio nel suolo in base alla suddivisione della sostanza organica in diversi pool (Molina e Smith, 1998). Un pool viene definito come: "un compartimento che contiene materiali chimicamente indistinguibili e ugualmente accessibili alle piante o alla popolazione microbica del suolo" (Smith *et al.*, 2002). Quindi sia la sostanza organica del terreno che quella aggiunta attraverso i residui colturali o i fertilizzanti organici viene assegnata ad uno o più pool ognuno dei quali avrà proprietà specifiche (rapporto C/N, velocità di decomposizione, etc.) che permettono di simularne dinamicamente la decomposizione.

I diversi modelli esistenti utilizzano strutture differenti per rappresentare il carbonio e l'azoto presenti nel terreno; ad esempio il modello CENTURY utilizza

due pool per i residui colturali (strutturale a lenta decomposizione, e metabolico a rapida decomposizione) e tre pool per la sostanza organica del suolo (Parton *et al.*, 1994).

Nei modelli ogni pool viene rappresentato da una variabile di stato e i corrispondenti tassi di variazione sono calcolati in modo specifico a seconda delle caratteristiche dei pool e delle relazioni esistenti tra di essi. Inoltre ogni singolo pool può essere rappresentato in modo differente: ad esempio è possibile replicare un pool a diverse profondità per tener conto degli effetti delle lavorazioni o dell'incorporazione di materiali organici nel terreno. Quindi, così come possiamo realisticamente dividere la sostanza organica del suolo in differenti frazioni caratterizzate ciascuna da un livello di attività specifico e costante, nei modelli di simulazione si assume che ogni frazione subisca il processo di mineralizzazione secondo una cinetica di primo ordine (McGill, 1996).

In linea generale il tasso di variazione del contenuto di carbonio nel suolo sarà calcolato all'interno di un modello con l'equazione:

$$\frac{dC}{dt} = -k \times C$$

dove k è il coefficiente di mineralizzazione espresso in tempo⁻¹, (generalmente giorni).

Risolvendo tale equazione i modelli di simulazione ci permettono di stimare il contenuto di carbonio nei diversi pool per ogni istante di tempo (t).

Dalla risoluzione della prima equazione otteniamo:

$$\frac{dC}{C} = -k \times dt$$

$$\int \frac{dC}{C} = -\int k \times dt$$

$$\ln|C| = -kt + c$$

$$C = c \times \exp(-kt)$$

L'equazione finale permette di calcolare il contenuto di carbonio per un determinato pool e al momento t , mentre la prima equazione indica una riduzione del contenuto di carbonio al passare del tempo in quanto il tasso di mineralizzazione è negativo evidenziando quindi una perdita di C in seguito ai processi biochimici che si verificano nel terreno.

L'utilizzo di uno o due differenti pool per rappresentare le frazioni della sostanza organica nel terreno risulta generalmente insufficiente per stimare il turnover della sostanza organica nel suolo anche se ultimamente l'approccio generale da parte di chi sviluppa i modelli di simulazione è quello di realizzare modelli semplificati che possano descrivere in maniera soddisfacente i cambiamenti nel contenuto di sostanza organica nel terreno nel lungo periodo (Jenkinson 1990). In generale nei modelli sono presenti da tre a quattro pool e di questi almeno uno comprende la biomassa microbica caratterizzata da una elevata attività. Tale ripartizione del carbonio e dell'azoto in differenti pool permette di rappresentare meglio la realtà in quanto i materiali non omogenei vengono suddivisi in differenti compartimenti aventi ognuno delle caratteristiche specifiche (Parton *et al.*, 1994).

1.5 IL MODELLO DI SIMULAZIONE EPIC (ENVIRONMENTAL POLICY INTEGRATED CLIMATE)

Il modello EPIC è stato sviluppato negli Stati Uniti nei primi anni '80, con lo scopo di valutare le interazioni esistenti tra l'erosione del suolo causata dal vento e dall'acqua ed il potenziale produttivo del suolo stesso per differenti pratiche agricole, tipologia di suoli e condizioni climatiche degli Stati Uniti (Williams *et al.*, 1983). In principio EPIC era l'acronimo di Erosion Productivity Impact Calculator in quanto il modello era focalizzato principalmente sullo studio delle relazioni esistenti tra l'erosione e la produttività del suolo (Williams *et al.*, 1990). Nel tempo il modello è stato continuamente implementato, sino a rendere possibile la simulazione dei numerosi processi che avvengono nel terreno in funzione degli eventi meteorologici, delle caratteristiche pedologiche e della gestione del suolo adottata prendendo il nome di Environmental Policy Integrated Climate (Williams, 1995).

Attualmente EPIC permette di simulare molteplici aspetti come ad esempio l'effetto che le decisioni di tipo gestionale avrebbero sulla dinamica di acqua, elementi nutritivi e fitofarmaci nel terreno oltre al loro impatto sull'erosione, sulla qualità dell'acqua e sulla produttività delle colture in aree caratterizzate da terreni con caratteristiche omogenee e stessa gestione da parte degli agricoltori.

Data la sua versatilità, sono molteplici i campi di applicazione di tale modello nella ricerca scientifica, EPIC infatti è stato utilizzato per analizzare l'effetto dell'erosione del terreno sulla produttività (Williams e Renard, 1995), per studiare il rischio di desertificazione (Costantini *et al.*, 2004), per studiare le variazioni produttive e di utilizzo delle risorse idriche in funzione dei mutamenti climatici (Brown e Rosenberg, 1997), per simulare la dinamica del carbonio nel suolo (Izaualde, 2006, 2007) e per simulare gli effetti dei mutamenti climatici sull'agricoltura (Allison e Thomson, 2006).

1.5.1 Descrizione del modello

EPIC è in grado di simulare le produzioni agricole a scala di campo, ciò è possibile simulando i processi di fotosintesi, evapotraspirazione e altri processi fondamentali che avvengono nelle piante e nel terreno. Il modello è in grado di creare simulazioni con scala temporale giornaliera (Brown, 1997) e se necessario può eseguire simulazioni aventi una durata anche di centinaia di anni (Williams *et al.*, 1990).

EPIC è costituito da diversi elementi, ed in particolare:

- ◆ un componente di tipo fisico, attraverso il quale si può simulare l'erosione, la crescita delle piante e i processi ad essi collegati;
- ◆ un componente di tipo economico per la valutazione, sempre attraverso le simulazioni, del "costo" del fenomeno erosivo di un suolo e delle strategie di gestione più vantaggiose.

L'intero modello (Williams *et al.*, 1990) è costituito da più "sub-modelli" tra loro connessi ognuno dei quali simula un determinato fenomeno o aspetto. Questi sub-modelli operano per i seguenti campi:

- ◆ idrologia;
- ◆ clima;
- ◆ erosione del suolo;
- ◆ dinamica degli elementi nutritivi nel suolo;
- ◆ temperatura del suolo;
- ◆ crescita delle piante;
- ◆ lavorazioni;
- ◆ fattori di controllo dell'ambiente di coltivazione;
- ◆ economia del sistema.

Per comprendere meglio ciò che ogni specifico sub-modello è in grado di simulare di seguito si riporta una loro analisi dettagliata.

1.5.1.1 Sub-modello per l'idrologia

Il sub-modello riguardante l'idrologia è in grado di simulare disparati fenomeni come:

- ◆ il ruscellamento superficiale delle acque (*surface runoff*), andando a

stimare il volume di acqua persa per ruscellamento e il massimo valore della portata del ruscellamento stesso;

- ◆ la percolazione dell'acqua nel terreno;
- ◆ i flussi idrici laterali nel terreno;
- ◆ l'evapotraspirazione, andando a stimare l'evaporazione potenziale dal terreno e l'evaporazione di suolo e piante;
- ◆ lo scioglimento della neve;
- ◆ i movimenti della falda.

Tutti questi fenomeni tengono conto di elementi fondamentali come la piovosità e le caratteristiche di tessitura e giacitura di un terreno.

1.5.1.2 Sub-modello climatico

EPIC, per il suo funzionamento, ha necessità di alcune variabili di tipo meteorologico quali: la piovosità, la temperatura dell'aria (massima e minima) e la radiazione solare. Inoltre se durante la simulazione si fa ricorso alla formula di Penman-Monteith per la stima dell'evapotraspirazione potenziale, è necessario inserire anche i valori relativi alla velocità del vento e all'umidità relativa dell'aria. Nel caso in cui si disponga di dati meteorologici giornalieri riferiti al sito per il quale viene effettuata la simulazione, questi verranno inseriti direttamente. Se non si è in possesso di tali dati EPIC sarà in grado di generare le variabili mancanti utilizzando le appropriate simulazioni per la stima di:

- ◆ precipitazioni (Nicks, 1974);
- ◆ temperatura dell'aria e radiazione solare (Richardson, 1981);
- ◆ vento (Richardson e Wright, 1984);
- ◆ umidità relativa.

1.5.1.3 Sub-modello per l'erosione del suolo

EPIC ha la capacità di simulare l'erosione del suolo causata da diversi fenomeni come:

- ◆ erosione dovuta al ruscellamento e alla pioggia, stimabile tramite una equazione che l'utente potrà scegliere tra 3 metodi differenti (metodo USLE, Wischmeier e Smith, 1978; il metodo MUSLE, Williams, 1975; ed

- il metodo USLE modificato da Onstand e Foster, 1975);
- ◆ erosione causata dall'adozione dell'irrigazione per scorrimento;
- ◆ erosione causata dal vento (Cole *et al.*, 1982);

1.5.1.4 Sub modello per la dinamica degli elementi nutritivi nel suolo

Questo sub-modello include diversi moduli per la simulazione della dinamica nel terreno dell'azoto e del fosforo.

Per l'elemento azoto EPIC è in grado di simulare:

- ◆ la perdita causata dal ruscellamento superficiale delle acque;
- ◆ la lisciviazione dei nitrati;
- ◆ il movimento dei nitrati nel suolo influenzato dall'evaporazione dell'acqua;
- ◆ la mineralizzazione (Seligman e van Keulen, 1981).

Il modello considera due differenti pool per la mineralizzazione dell'azoto: il pool dell'azoto organico considerato più labile, associato ai residui colturali e alla biomassa microbica, e il pool dell'azoto organico stabile nel terreno il quale fa riferimento all'humus presente nello stesso;

- ◆ l'immobilizzazione (Seligman e van Keulen, 1981).

Questo è un fattore particolarmente importante nel modello in quanto determina la velocità di decomposizione dei residui colturali;

- ◆ apporto di azoto da parte delle piogge.

Per quanto riguarda il fosforo i fattori simulati da EPIC sono:

- ◆ la perdita di fosforo solubile a causa del ruscellamento superficiale;
- ◆ il trasporto di fosforo da parte dei sedimenti;
- ◆ la mineralizzazione (Jones *et al.*, 1984);
- ◆ immobilizzazione (Jones *et al.*, 1984);
- ◆ ciclo del fosforo (Jones *et al.*, 1984).

1.5.1.5 Sub-modello per la simulazione della temperatura del suolo

EPIC è in grado, attraverso questo sub-modello, di stimare la temperatura media giornaliera nel centro di ogni orizzonte pedologico del terreno oggetto di studio.

Per effettuare questa simulazione, nelle equazioni utilizzate per rappresentare

l'andamento della temperatura del suolo, entrano in gioco diversi fattori come la densità apparente del terreno, il contenuto idrico dello stesso, la temperatura superficiale e il grado di copertura vegetale.

1.5.1.6 Sub-modello per la simulazione della crescita delle piante

EPIC utilizza un unico sub-modello per simulare la crescita delle diverse colture come ad esempio mais, frumento, orzo, avena, girasole, soia, erba medica, cotone, patata etc., per ognuna delle quali sono stati introdotti dei valori base caratteristici delle diverse specie. Inoltre il modello è in grado di simulare sia la crescita di specie annuali che di specie poliennali o perenni.

Per le specie annuali la crescita viene simulata dal momento della semina sino al momento della raccolta o, in alternativa, sino a quando le unità termiche accumulate non eguagliano le unità termiche potenziali per la coltura sulla quale viene effettuata la simulazione.

Per le specie perenni viene simulata sia la permanenza dell'apparato radicale che la dormienza nei mesi invernali. La ripresa vegetativa simulata avverrà quando la temperatura media giornaliera sarà maggiore della temperatura base della specie. Nel modello, lo sviluppo fenologico delle piante è basato sull'accumulo delle unità termiche (HU), calcolate secondo la formula:

$$HU_i = \left(\frac{T \max_i + T \min_i}{2} \right) - T_b$$

Dove: Tmax è la temperatura massima del giorno i;

Tmin è la temperatura minima del giorno i;

Tb è la temperatura base della specie considerata

Il sub-modello facente riferimento alla crescita delle piante è anche in grado di stimare la loro crescita potenziale. Questa è stimata tramite l'equazione:

$$\Delta Bp_{,i} = 0,001 \times (BE)_j \times (PAR)_i \times (1 + \Delta HRLT_i)^3$$

Dove: $\Delta B_{p,i}$ rappresenta l'incremento giornaliero potenziale della biomassa espresso in $t\ ha^{-1}$;

BE è un parametro specifico per la coltura e rappresenta la quantità di biomassa prodotta per unità energetica ricevuta dalla radiazione solare ($kg\ MJ^{-1}$);

PAR è la radiazione fotosinteticamente attiva ($MJ\ m^{-2}$) stimata tramite la legge di Beer (Monsi e Saeki, 1953);

$\Delta HRLT$ rappresenta la variazione della lunghezza del giorno espresso come rapporto h/d . Quest'ultimo parametro permette l'aumento della crescita durante la primavera e la riduce durante l'inverno (Backer *et al.*, 1980). La lunghezza del giorno (HRLT) viene calcolata dal modello considerando il giorno dell'anno e la latitudine.

EPIC è in grado di simulare anche l'utilizzo della risorsa idrica da parte delle piante. Questo valore è calcolato sulla base dell'evaporazione potenziale e del valore dell'indice di area fogliare (LAI) raggiunto (Ritchie, 1972). Inoltre l'utilizzo dell'acqua disponibile varia in funzione della profondità raggiunta dall'apparato radicale.

Viene inoltre simulato l'assorbimento dei diversi elementi nutritivi. Sia per l'azoto che per il fosforo viene simulato l'assorbimento da parte delle piante ed inoltre, esclusivamente per l'azoto e per le specie appartenenti alle leguminose, viene simulata anche la fissazione.

Sempre attraverso questo sub-modello vengono presi in considerazione i fattori che possono limitare lo sviluppo vegetativo delle piante. Il sub-modello infatti stima l'incidenza degli stress di tipo idrico, nutritivo e termico, di quelli dovuti ad asfissia radicale e quelli legati alla radiazione. In EPIC gli stress vanno ad influenzare l'accumulo di biomassa, l'accrescimento delle radici e le produzioni.

La stima della biomassa prodotta è ottenuta moltiplicando la biomassa potenziale prodotta per un fattore di regolazione della crescita (REG) che tiene conto dell'entità degli stress a cui la pianta è sottoposta.

$$\Delta B = (\Delta B_p) \times (REG)$$

Lo stress idrico viene calcolato considerando sia gli apporti idrici alla coltura che le richieste della stessa. Questo si basa sul concetto che ad una riduzione dell'acqua disponibile nel terreno corrisponde una riduzione della biomassa prodotta proporzionale alla riduzione della traspirazione (Hanks, 1983).

Lo stress causato dalla mancanza di elementi nutritivi viene calcolato in base al rapporto tra la quantità di azoto e fosforo accumulato nella pianta ed il loro valore ottimale.

La riduzione della capacità di sviluppo dell'apparato radicale è simulata prendendo in considerazione alcune caratteristiche del suolo che possono indurre situazioni di stress. Tra queste vi sono la densità apparente, la tessitura ed il contenuto idrico (Eavis, 1972; Monteith e Banath, 1965; Taylor *et al.*, 1966), la temperatura (Taylor, 1983) e l'eccessivo contenuto di alluminio che potrebbe risultare tossico (Abruna *et al.*, 1982; Brenes e Pearson, 1973; Pavan *et al.*, 1982). Dato che la sensibilità all'alluminio cambia da specie a specie, EPIC simula la risposta delle piante all'eccessiva presenza di alluminio nel suolo in funzione della loro sensibilità (Foy *et al.*, 1974; Mugwira *et al.*, 1980).

Per ciò che riguarda la simulazione della resa colturale, essa viene ridotta in funzione degli stress idrici, i quali riducono il valore dell'harvest index. Inoltre viene considerato il momento in cui tale stress si verifica; ad esempio, diverse colture da granella risultano essere particolarmente sensibili agli stress idrici durante il periodo della fioritura, momento in cui la pianta svolge diverse funzioni fisiologiche fondamentali per la determinazione della produzione di seme (Doorenbos e Kassam, 1979).

Il sub-modello della crescita delle piante permette anche di simulare la dormienza nei mesi invernali. Tale fenomeno viene simulato tramite il blocco delle attività vegetative in funzione della lunghezza del giorno.

1.5.1.7 Sub-modello lavorazioni

Il sub-modello delle lavorazioni in EPIC è stato sviluppato per simulare il rimescolamento degli elementi nutritivi e dei residui colturali entro lo strato di terreno lavorato e simulando al tempo stesso i cambiamenti di densità apparente e l'interramento dei residui colturali eventualmente presenti in campo. Per

impostare correttamente la simulazione è necessario indicare la data, la tipologia e la profondità di ogni lavorazione eseguita.

1.5.1.8 Sub-modello per la simulazione dei fattori che controllano l'ambiente di coltivazione

Questo sub-modello fornisce dei meccanismi attraverso i quali vengono simulate la pratica dell'irrigazione, la concimazione, la distribuzione di fitofarmaci e l'eventuale presenza di un sistema di drenaggio.

Per ciò che concerne l'irrigazione è possibile simulare la coltivazione di una determinata specie sia in ambiente irriguo che senza l'ausilio di tale pratica. Nel caso in cui si scelga di simulare l'irrigazione è possibile specificare il metodo irriguo adottato (es. a pioggia, per scorrimento etc.), se l'irrigazione dovrà essere simulata in momenti definiti dall'utente o se il momento degli interventi irrigui dovrà essere calcolato automaticamente da EPIC durante la simulazione. Nel qual caso si decidesse di selezionare l'irrigazione automatica, sarà il modello a stabilire quando eseguire l'irrigazione e quale volume irriguo adottare in funzione sia del massimo livello di stress idrico sopportabile dalla coltura (impostato in funzione della specie) che del massimo volume di adacquamento e del massimo volume stagionale. Al contrario, con l'irrigazione non automatica sarà l'utente a dover definire tempi e quantità per gli interventi irrigui.

Anche per la concimazione è possibile impostare manualmente il momento di ogni singolo intervento o selezionare la modalità automatica. In quest'ultimo caso è necessario inserire i seguenti valori:

- ◆ livello minimo di azoto al di sotto del quale effettuare la fertilizzazione;
- ◆ il quantitativo massimo di azoto somministrabile durante la stagione di crescita;
- ◆ l'intervallo minimo espresso in giorni tra due interventi di concimazione.

EPIC considera elementi dannosi per le piante (*pest factors*) gli insetti, la presenza di erbe infestanti e le malattie causate da funghi, batteri e/o virus. Questi costituiscono dei fattori di riduzione della resa potenziale e le rese delle colture vengono simulate riducendo la stessa resa potenziale in funzione dell'incidenza dei *pest factors*.

I sistemi di drenaggio vengono simulati come una alterazione dei naturali movimenti dell'acqua all'interno del terreno. Il modello, per poter simulare tali sistemi, richiede informazioni sulla profondità a cui vengono posti i dreni (corrispondente ad un determinato orizzonte) e sul tempo necessario al sistema per allontanare l'acqua in eccesso nel suolo.

1.5.1.9 Sub-modello per l'economia del sistema

Tale sub-modello tiene conto dei costi di produzione e di quelli sostenuti per la commercializzazione della coltura. I costi vengono suddivisi in due gruppi: costi variabili in funzione della resa e costi fissi. Tutte le voci di spesa vengono eliminate al momento della raccolta e tutti i costi delle operazioni eseguite dopo tale data verranno "caricati" sulla coltura successiva.

1.5.2 Implementazione del modello EPIC per la simulazione della dinamica della sostanza organica nel suolo

Le prime versioni del modello EPIC simulavano la dinamica dell'azoto nel terreno grazie all'incorporazione del modello PAPRAN (Seligman e van Keulen, 1981) ma mancava un componente che permettesse di spiegare realisticamente le interazioni esistenti tra carbonio e azoto nel terreno e le trasformazioni che questi elementi subiscono.

Con l'obiettivo di colmare tale lacuna il modello EPIC è stato successivamente implementato (Izaurre et al., 2006) con un nuovo modulo per la simulazione della dinamica del carbonio basato sul modello Century (Parton et al., 1994).

1.5.2.1 Approccio concettuale

Il submodello per la simulazione della sostanza organica in EPIC segue l'approccio utilizzato nel modello Century (Parton et al., 1987, 1993, 1994; Vitousek et al., 1994). In tale approccio sia il carbonio organico che l'azoto

presenti nel terreno sono divisi in tre frazioni denominate: *microbial biomass*, *slow humus* e *passive humus* (Figura 1.4).

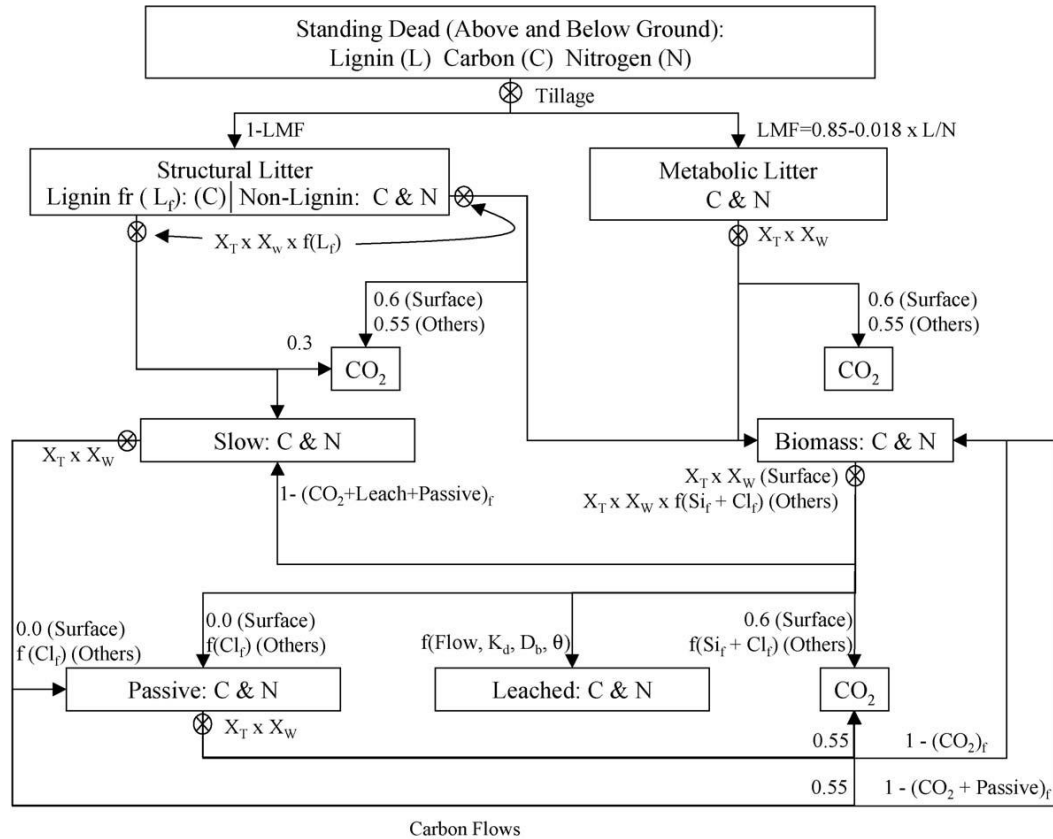


Figura 1.4 – Flussi di carbonio (C) nel modello EPIC. I numeri indicano la frazione del flusso di C che viene destinata alla CO₂. Simbologia: X_W e X_T fanno riferimento all'umidità e alla temperatura che vanno a controllare i processi microbici; LMF frazione "metabolica" della lettiera (kg kg⁻¹); L_f frazione della "structural litter" costituita da lignina (kg kg⁻¹); f indica una funzione, f posta al pedice indica una frazione; S_{if} indica la frazione minerale rappresentata dal limo; Cl_f indica la frazione minerale rappresentata dall'argilla; K_d è un coefficiente per la distribuzione dei componenti organici tra la fase liquida e quella solida; D_b rappresenta la densità apparente; θ rappresenta il contenuto idrico del suolo. I flussi che vengono divisi in due parti sono rappresentati mediante una freccia con due teste.

Tali frazioni oltre a differire per le loro dimensioni e funzioni, si distinguono per la differente velocità del loro turnover il quale varia da alcuni giorni o settimane per la biomassa microbica sino a centinaia di anni per la sostanza organica definita "passiva". Inoltre il modello è in grado di simulare, sia per il carbonio che per l'azoto, le perdite dovute alla lisciviazione o alla volatilizzazione.

I residui organici come ad esempio i residui colturali, le radici o i concimi organici, che giungono alla superficie del terreno o che vengono incorporati nel

suolo sono divisi dal modello in due frazioni, entrambe riferite alla lettiera, definite metabolica e strutturale. Tale approccio è stato adottato sia da McGill *et al.* (1981) che da Parton *et al.*, (1987) ma in EPIC la divisione tra le due frazioni avviene, come fatto da Parton *et al.* in base al contenuto di lignina e di azoto.

Per quanto riguarda le trasformazioni riguardanti la sostanza organica si hanno alcune differenze tra il modello EPIC e Century.

1. Le equazioni per la lisciviazioni attualmente implementate in EPIC sono utilizzate anche per simulare il movimento dei materiali organici dalla superficie agli strati più profondi del terreno. Century utilizza invece la quantità mensile di acqua che percola oltre i 30 cm di profondità oltre al contenuto di sabbia ed argilla del suolo.
2. In EPIC la lettiera superficiale comprende anche una frazione con turnover lento (*slow compartment*) che va ad aggiungersi alle frazioni metabolica e strutturale della lettiera già presenti nel modello Century (Parton *et al.*, 1994).
3. In EPIC la concentrazione di lignina viene modellata in funzione dell'età delle piante, mentre nel modello Century in funzione delle precipitazioni annue (Parton *et al.*, 1987).

1.5.2.2 Ripartizione dei componenti della lettiera

Si assume che i composti organici derivanti dai residui colturali (*standing dead*, STD) assorbano azoto in forma minerale facendo sì che il loro contenuto di azoto originale (STDN) aumenti (STDN enriched, STDNE) (Parton *et al.*, 1987).

Operativamente si ha:

$$\text{STDNE}_i = \begin{cases} \text{STDN}_i + S_f \times (W_{\text{NO}_3} + W_{\text{NH}_3}); & \text{CNR} \geq 10 \\ \text{STDN}_i; & \text{CNR} < 10 \end{cases} \quad (1)$$

Il rapporto tra lignina contenuta nei residui colturali che formano la lettiera (STD_L) e l'azoto nei nuovi residui che si sono aggiunti (STDNE) viene utilizzato per calcolare la frazione metabolica (LMF) e strutturale (LSF) della lettiera:

$$LMF = \begin{cases} 0,85 - \frac{0,018 \times STDL}{STDNE}; & \frac{STDL}{STDNE} < 47,22 \\ 0,0; & \frac{STDL}{STDNE} = 47,22 \end{cases} \quad (2)$$

$$LSF = 1 - LMF \quad (3)$$

La massa della frazione metabolica (LM) e strutturale (LS) segue invece la formula:

$$LM = LMF \times STD \quad (4)$$

$$LS = LSF \times STD \quad (5)$$

Di conseguenza tutta la lignina derivante dai residui colturali viene assegnata alla frazione strutturale della lettiera (Parton *et al.*, 1987). In seguito all'arrivo di nuova biomassa la lignina nella frazione strutturale della lettiera (LSL) e la frazione strutturale della lettiera (LSLF), costituita fundamentalmente dal lignina, sono ottenuti come:

$$LSL = STDL \quad (6)$$

$$LSLF = \frac{LSL}{LS} \quad (7)$$

Alla frazione strutturale della lettiera è assegnato un rapporto C/N fisso pari a 150; tale valore è adottato sia da Parton *et al.* (1987) che da McGill *et al.* (1981). La quantità di carbonio (LSC), di azoto (LSN) e la frazione azotata (LSNF) della frazione strutturale della nuova biomassa addizionata al suolo sono calcolati come segue:

$$LSC = C_f \times LSF \times STD \quad (8)$$

$$LSN = \begin{cases} \frac{LSC}{150}; & STDNE \geq \frac{LSC}{150} \\ STDNE; & STDNE < \frac{LSC}{150} \end{cases} \quad (9)$$

$$LSNF = \frac{LSN}{LS} \quad (10)$$

In modo analogo il carbonio (LMC), l'azoto (LMN) e la frazione azotata (LMNF) della frazione metabolica della lettiera sono calcolati secondo le seguenti formule:

$$LMC = C_f \times LM \quad (11)$$

$$LMN = STDNE - LSN + 10^{-25} \quad (12)$$

$$LMNF = \frac{LMN}{LM} \quad (13)$$

1.5.2.3 Trasformazioni potenziali del carbonio e dell'azoto

Inizialmente EPIC calcolava le possibili trasformazioni in base a costanti specifiche in funzione del substrato, della temperatura e del contenuto idrico; inoltre alcune di queste trasformazioni venivano influenzate dal contenuto di lignina e dalla tessitura del terreno. Tali trasformazioni sono però considerate solo come potenziali in quanto esse avverranno solamente quando le quantità di azoto e carbonio organico ed inorganico a disposizione sono sufficienti per il completamento di tali trasformazioni.

Di seguito si riporta una sintesi della descrizione delle equazioni che regolano tali trasformazioni (Izaurre et al., 2006).

La trasformazione potenziale del carbonio contenuto nella frazione strutturale della lettiera (LSCTP) presente sulla superficie del terreno e/o incorporata al suo interno viene calcolata tramite la formula:

$$LSCTP = LSC \times LSR \times X_{LSLF} \times CS \quad (14)$$

dove:

$$X_{LSLF} = \exp(-3 \times LSLF) \quad (15)$$

$$CS = \begin{cases} \sqrt{(CGD \times SUT)} \times 0,8 \times OX \times X1; & CS < 10 \\ 10; & CS \geq 10 \end{cases} \quad (15a)$$

$$CDG = \begin{cases} \frac{STMP}{[STMP + \exp(5,058 - 0,2504 \times STMP)]}; & STMP \leq 35,0 \\ 1,0 - 0,04 \times STMP; & STMP > 35,0 \end{cases} \quad (15b)$$

$$SUT = \begin{cases} \sqrt{\frac{X1}{FC - S15}}; & SUT < 1 \\ 1; & SUT \geq 1 \end{cases} \quad (15c)$$

$$OX = 1 - \frac{0,9 \times Z5}{Z5 + \exp(16,79 - 0,0196 \times Z5)} \quad (15d)$$

$$X1 = \exp(6,0 \times (DB - DBP)) \quad (15e)$$

La trasformazione potenziale del carbonio contenuto nella lignina della frazione strutturale della lettiera (LSLCTP) viene calcolato come segue:

$$LSLCTP = LSCTP \times LSLF \quad (16)$$

mentre la trasformazione potenziale del carbonio (LSL_NCTP) e dell'azoto (LSNTP) nei componenti non lignificati e facenti parte comunque della frazione strutturale della lettiera sono calcolati rispettivamente con:

$$LSL_NCTP = LSCTP \times (1 - LSLF) \quad (17)$$

$$LSNTP = LMN \times \left(\frac{LMCTP}{LMC} \right) \quad (18)$$

Il tasso di trasformazione potenziale della frazione metabolica della lettiera è ottenuto per il carbonio come:

$$LMCTP = CS \times LMR \times LMC \quad (19)$$

dove: CS rappresenta un insieme di fattori che controllano i processi biologici

LMR è il tasso di trasformazione in condizioni ottimali

LMC quantità di carbonio presente nella *metabolic litter*

Mentre per l'azoto è ottenuto con la formula:

$$LMNTP = LMN \times \left(\frac{LMCTP}{LMC} \right) \quad (20)$$

In EPIC la biomassa microbica funge come comparto per la compensazione e redistribuzione sia del carbonio che dell'azoto. Questa riceve il carbonio e l'azoto dai composti non lignificati presenti nella frazione strutturale e metabolica della lettiera e dalle frazioni *slow* e *passive humus*, oltre a ricevere l'azoto derivante da NH_3 e NO_3^- . Il turnover e la morte della biomassa microbica ridistribuiscono poi il carbonio e l'azoto tra: CO_2 , *slow* e *passive humus* e materiale lisciviato a cui si aggiungono il carbonio che viene destinato alla CO_2 e l'azoto destinato all' NH_3 . La trasformazione potenziale del carbonio e dell'azoto contenuti nella biomassa microbica sono ottenuti matematicamente come il prodotto tra il carbonio (o azoto) della biomassa (BMC / N), il tasso di trasformazione in condizioni potenziali (BMR), una combinazione di fattori che controllano i processi biologici (CS) ed il controllo esercitato su tale trasformazione della tessitura e struttura del suolo (X_{BMT}):

$$BMCTP = BMC \times BMR \times CS \times X_{BMT} \quad (21)$$

$$BMNTP = BMN \times \left(\frac{BMCTP}{BMC} \right) \quad (22)$$

Il valore per X_{BMT} è pari a 1 per la lettiera superficiale mentre per gli altri strati del

terreno è pari a: $1 - 0,75 \times (\text{SILF} + \text{CLAF})$ (Parton *et al.*, 1993, 1994).

La frazione definita "*slow humus*" è costituita da quella parte dei residui colturali più resistenti (Parton *et al.*, 1993, 1994; Vitousek *et al.*, 1994). La trasformazione potenziale di questo pool è ottenuta come prodotto tra la quantità di carbonio nel pool stesso (HSC), il tasso di trasformazione in condizioni ottimali (HSR) ed il parametro CS precedentemente citato:

$$\text{HSCTP} = \text{HSC} \times \text{HSR} \times \text{CS} \quad (23)$$

$$\text{HDNTP} = \text{HSN} \times \left(\frac{\text{HSCTP}}{\text{HSC}} \right) \quad (24)$$

La frazione definita invece "*passive humus*" è caratterizzata da un turnover particolarmente lento e si pensa che i suoi componenti vengano in parte protetti dalle trasformazioni e degradazioni per via del loro assorbimento da parte delle argille. Di conseguenza il contenuto di argilla del suolo influenza la trasformazione di tale pool ed è in parte la causa del suo turnover estremamente lento (Parton *et al.*, 1993, 1994). Inoltre, data l'associazione con le argille, tale frazione della sostanza organica non è presente nello strato più superficiale del terreno.

La trasformazione potenziale del *passive humus* è calcolata come prodotto tra il contenuto di carbonio nella frazione in esame (HSC), il suo tasso di trasformazione in condizioni ottimali (HPR) e CS:

$$\text{HPCTP} = \text{HPC} \times \text{HPR} \times \text{CS} \quad (25)$$

$$\text{HPNTP} = \text{HPN} \times \left(\frac{\text{HPCTP}}{\text{HPC}} \right) \quad (26)$$

1.5.2.4 Allocazione dei componenti trasformati

All'interno del modello EPIC una volta avvenute le trasformazioni dei diversi componenti della sostanza organica i risultati di tali trasformazioni vengono allocati in nuove frazioni.

I componenti derivanti dalla trasformazione della *structural litter* vengono ripartiti tra CO₂, biomassa e *slow humus* ed in particolare la trasformazione della lignina porta alla formazione di *slow humus* e CO₂. Per contro i composti derivanti dalla trasformazione della restante parte (composti non lignificati) sono indirizzati verso la biomassa a più rapida degradazione e CO₂. La frazione di carbonio derivante dai componenti lignificati della *structural litter* che viene trasformata in CO₂ (ALSLCO₂) è fissata a 0,3 mentre la quota restante (0,7) è destinata allo *slow humus*. Allo stesso modo la frazione di carbonio derivante dai componenti non lignificati della *structural litter* che viene allocata alla CO₂ (ALSLNCO₂) ha un valore di 0,6 per la lettiera superficiale e 0,55 per quella incorporata nel terreno (Parton *et al.*, 1994) mentre la quota rimanente (rispettivamente 0,4 e 0,45) viene destinata alla biomassa.

Le trasformazioni subite dalla "*metabolic litter*" portano alla formazione di CO₂ (ALMCO₂: per la superficie = 0,6; incorporata nel terreno = 0,55) e biomassa (1-ALMCO₂) (Parton *et al.*, 1994).

Nella lettiera superficiale il carbonio derivante dalla biomassa microbica diventa sia CO₂ (ABCO₂: 0,6) che *slow humus* (1-ABCO₂). Negli strati più profondi del terreno il carbonio derivante dalla biomassa viene invece ripartito tra la CO₂, *passive humus* ed in parte subisce il fenomeno della lisciviazione in base alla tessitura del terreno. La ripartizione in CO₂ della biomassa incorporata nel terreno $[ABCO_2 = 0,85 - 0,68 \times (CLAF + SILF)]$ diminuisce all'aumentare della percentuale di limo ed argilla nel suolo; la ripartizione verso il fenomeno della lisciviazione $[ABL = (1 - \exp(SW + Koc \times C \times DB \times Z))]$ è calcolata in funzione del flusso idrico (f ; mm h⁻¹), del contenuto idrico del terreno (SW; mm), del coefficiente di assorbimento liquido-solido per la biomassa microbica (Koc; m³ Mg⁻¹), del carbonio organico nel suolo (C; Mg Mg⁻¹), della densità apparente del suolo (DB; Mg m⁻³) e dello spessore dello strato di terreno considerato (Z; mm) (Williams, 1995). La ripartizione verso il *passive humus* $[ABP = 0$ (*surface litter*);

$ABP = 0,003 + 0,032 \times CLAF$ (in tutti gli altri strati)] aumenta all'aumentare della componente argillosa del terreno (Parton *et al.*, 1993, 1994) e la quota rimanente è destinata allo *slow humus* ($1 - ABCO_2 - ABL - ABP$).

In seguito alla sua trasformazione lo *slow humus* è ripartito tra CO_2 ($ASCO_2: 0,55$), *passive humus* [$ASP = 0$ (*surface litter*); $ASP = 0,003 - 0,009 \times CLAF$ (in tutti gli altri strati)] e biomassa ($1 - ASCO_2 - ASP$) (Parton *et al.*, 1993, 1994). In modo analogo i componenti derivanti dalla trasformazione del *passive humus* sono divise tra CO_2 ($APCO_2: 0,55$) e biomassa ($1 - APCO_2$).

1.5.2.5 Trasformazioni effettive di carbonio ed azoto

In EPIC le trasformazioni effettive (o reali) di carbonio ed azoto vengono calcolate in base alla disponibilità di azoto per ogni trasformazione potenziale descritta nel paragrafo precedente. La quantità di azoto richiesta viene determinata dalla trasformazione potenziale del carbonio nel compartimento che funge da fonte di azoto (e che a sua volta ha una richiesta di azoto) e dal rapporto N/C del compartimento di destinazione dell'azoto stesso. Il rapporto N/C del compartimento di destinazione varia in funzione del substrato e delle condizioni del suolo (Parton *et al.*, 1993; Vitousek *et al.*, 1994). Ad esempio tale rapporto nella biomassa formata a partire dalla lettiera superficiale (NCBM) è calcolato come funzione lineare del contenuto di azoto del materiale organico in decomposizione ($N_f = 100 \times STDNE / STD$) (Parton *et al.*, 1993).

$$NCBM = \begin{cases} \frac{1}{-5,0251 \times N_f + 20,05}; & 2 \geq N_f \geq 0,01 \\ 0,05; & N_f < 0,01 \\ 0,1; & N_f > 2 \end{cases} \quad (27)$$

Il rapporto N/C dello *slow humus* (NCHS) è cinque volte maggiore di quello dei microrganismi superficiali da cui deriva. Il rapporto N/C di: biomassa, *slow humus* e *passive humus* (NCHP), formato a partire dalla lettiera incorporata nel terreno, viene calcolato come funzione del contenuto di azoto minerale del suolo (MINT). Per la biomassa il rapporto N/C è calcolato come segue:

$$\text{NCBM} = \begin{cases} \frac{1}{b \times \text{MINT} + a}; & \text{MINT} \leq 20 \text{ kg ha}^{-1} \\ 0,33; & \text{MINT} > 20 \text{ kg ha}^{-1} \end{cases} \quad (28)$$

Nell'equazione 28 i valori dei coefficienti b e a sono rispettivamente -0,6 e 15. La richiesta di azoto (PN) viene successivamente calcolata per tutti i potenziali trasferimenti (PT) e viene confrontata con l'effettiva disponibilità di azoto. Se la quantità di l'azoto disponibile è tale da soddisfare completamente la domanda complessiva di tutti i compartimenti allora la trasformazione da potenziale diviene una trasformazione reale. In questo modo i flussi di carbonio ed azoto calcolati sono sommati ai compartimenti di destinazione e sottratti dai compartimenti che fungono da fonte.

$$\text{PT}_1: \text{Structural Litter} \rightarrow \text{Biomass} \quad \text{PN}_1 = \text{LSL}_{\text{NCTP}} \times (1 - \text{ALSL}_{\text{NCO}_2}) \times \text{NCBM} \quad (29)$$

$$\text{PT}_2: \text{Structural Litter} \rightarrow \text{Slow} \quad \text{PN}_2 = \text{LSLCTP} \times (1 - \text{ALSLCO}_2) \times \text{NCHS} \quad (30)$$

$$\text{PT}_3: \text{Metabolic Litter} \rightarrow \text{Biomass} \quad \text{PN}_3 = \text{LMCTP} \times (1 - \text{ALMCO}_2) \times \text{NCBM} \quad (31)$$

$$\text{PT}_4: \text{Biomass} \rightarrow \text{Leaching} \quad \text{PN}_4 = \text{BMCTP} \times \text{ABL} \times \text{NCBM} \quad (32)$$

$$\text{PT}_5: \text{Biomass} \rightarrow \text{Passive} \quad \text{PN}_5 = \text{BCTP} \times \text{ABP} \times \text{NCHP} \quad (33)$$

$$\text{PT}_6: \text{Biomass} \rightarrow \text{Slow} \quad \text{PN}_6 = \text{BMCTP} \times (1 - \text{ABL} - \text{ABP} - \text{ABCO}_2) \times \text{NCHS} \quad (34)$$

$$\text{PT}_7: \text{Slow} \rightarrow \text{Biomass} \quad \text{PN}_7 = \text{HSCTP} \times (1 - \text{ASCO}_2 - \text{ASP}) \times \text{NCBM} \quad (35)$$

$$\text{PT}_8: \text{Slow} \rightarrow \text{Passive} \quad \text{PN}_8 = \text{HSCTP} \times \text{ASP} \times \text{NCHP} \quad (36)$$

$$\text{PT}_9: \text{Passive} \rightarrow \text{Biomass} \quad \text{PN}_9 = \text{HPCTP} \times (1 - \text{APCO}_2) \times \text{NCBM} \quad (37)$$

$$\text{PT}_{10}: \text{Plant Demand} \quad \text{PN}_{10} = \text{UNDP} \quad (\text{UND, Williams, 1995}) \quad (38)$$

La richiesta totale di azoto (NTP) è calcolata come:

$$\text{NTP} = \sum \text{PN}_i \quad (39)$$

La mineralizzazione dell'azoto (NMIN) o la sua immobilizzazione potenziale (*competitive potential*; CPN) viene calcolata per ognuna delle trasformazioni dell'azoto riportate in precedenza. Ad esempio la mineralizzazione dell'azoto durante la trasformazione della *structural litter* (NMIN₁) è data dalla differenza tra

la trasformazione potenziale dell'azoto nella *structural litter* (LSNTP; eq (18)) e la domanda per tale trasformazione (PN₁ e PN₂; eq. (29) e (30)) con la condizione che:

$$\text{LSNTP} \geq \text{PN}_1 + \text{PN}_2 \text{ (eq (40)).}$$

In caso contrario EPIC calcola un potenziale di immobilizzazione, per quella trasformazione, pari alla quantità di azoto per la quale la trasformazione considerata deve competere per raggiungere il suo potenziale (CNP₁):

$$\begin{aligned} \text{NMIN}_1 &= \text{LSNTP} - (\text{PN}_1 + \text{PN}_2); \\ \text{LSNTP} &\geq \text{PN}_1 + \text{PN}_2 \\ \text{CNP}_1 &= \text{PN}_1 + \text{PN}_2 - \text{LSNTP}; \\ \text{LSNTP} &< \text{PN}_1 + \text{PN}_2 \end{aligned} \quad (40)$$

Calcoli simili vengono effettuati anche per la trasformazione dell'azoto dalla *metabolic litter* in biomassa (NMIN₂, CPN₂), per il turnover della biomassa (NMIN₃, CPN₃), per il turnover dello *slow humus* (NMIN₄, CPN₄) e per il turnover del *passive humus* (NMIN₅, CPN₅):

$$\begin{aligned} \text{NMIN}_2 &= \text{LMNTP} - \text{PN}_3; & \text{LMNTP} &\geq \text{PN}_3 \\ \text{CPN}_2 &= \text{PN}_3 - \text{LMNTP}; & \text{LMNTP} &< \text{PN}_3 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \text{NMIN}_3 &= \text{BMNTP} - \text{PN}_4 + \text{PN}_5 + \text{PN}_6; & \text{BMNTP} &\geq \text{PN}_4 + \text{PN}_5 + \text{PN}_6 \\ \text{CPN}_3 &= \text{PN}_4 + \text{PN}_5 + \text{PN}_6 - \text{BMNTP}; & \text{BMNTP} &< \text{PN}_4 + \text{PN}_5 + \text{PN}_6 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \text{NMIN}_4 &= \text{HSNTP} - \text{PN}_7 + \text{PN}_8; & \text{HSNTP} &\geq \text{PN}_7 + \text{PN}_8 \\ \text{CPN}_4 &= \text{PN}_7 + \text{PN}_8 - \text{HSNTP}; & \text{HSNTP} &< \text{PN}_7 + \text{PN}_8 \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \text{NMIN}_5 &= \text{HPNTP} - \text{PN}_9; & \text{HPNTP} &\geq \text{PN}_9 \\ \text{CPN}_5 &= \text{PN}_9 - \text{HPNTP}; & \text{HPNTP} &< \text{PN}_9 \end{aligned} \quad (44)$$

La mineralizzazione totale dell'azoto (NMING) è calcolata tramite l'equazione (45) come sommatoria di tutte le trasformazioni parziali dell'azoto (NMIN_i).

La domanda competitiva totale netta per l'azoto (SUMP) è calcolata invece come

sommatoria di tutte le richieste derivanti dalle trasformazioni considerando anche l'assorbimento da parte delle piante ($CPN_6 = PN_{10}$) per soddisfare il loro fabbisogno di azoto come da equazione (46).

$$NMING = \sum NMIN_i \quad (45)$$

$$SUMP = \sum CPN_i \quad (46)$$

Il valore del parametro SUMP viene successivamente comparato con la quantità di azoto minerale disponibile: se $SUMP \leq MINTP$ ogni richiesta di azoto potrà essere soddisfatta e di conseguenza le trasformazioni da potenziali diventeranno reali. Al contrario se $SUMP > MINTP$ la domanda totale di azoto supera la quantità di azoto disponibile ed il modello calcolerà, per la domanda netta e per ogni trasformazione potenziale, una riduzione proporzionale a tale disavanzo con la seguente equazione (47).

$$CPN_i = \frac{CPN_i}{SUMP} \times MINTMP \quad (47)$$

La somma di tutti i valori ricalcolati di CPN_i , ad eccezione delle richieste da parte delle piante (CPN_6), determina l'immobilizzazione dell'azoto (NIMMOB; equazione (48)). L'Immobilizzazione netta dell'azoto (NMINET) viene invece calcolata secondo l'equazione (49).

$$NIMMOB = \sum CPN_i \quad (48)$$

$$NMINET = NMING - NIMMOB \quad (49)$$

Successivamente il modello calcola le trasformazioni reali di carbonio ed azoto in funzione della disponibilità di azoto e se il valore di $CPN_i = 0$ le trasformazioni reali sono calcolate secondo quanto stabilito dalle equazioni 50 - 62 di seguito riportate:

$$LSCTA = \frac{LSCTP \times CPN_1}{PN_1 + PN_2 - LSNTP} \quad (50)$$

$$LSLCTA = \frac{LSLCTP \times LSCTA}{LSCTP} \quad (51)$$

$$LSLNCTA = \frac{LSLNCTP \times LSCTA}{LSCTP} \quad (52)$$

$$LSNTA = \frac{LSNTP \times LSCTA}{LSCTP} \quad (53)$$

$$LMCTA = \frac{LMCTP \times CPN_2}{PN_3 - LMNTP} \quad (54)$$

$$LMNTA = \frac{LMNTP \times LMCTA}{LMCTP} \quad (55)$$

$$BMCTA = \frac{BMCTP \times CPN_3}{PN_4 + PN_5 + PN_6 - BMNTP} \quad (56)$$

$$BMNTA = \frac{BMCTA}{BMCTP} \quad (57)$$

$$HSCTA = \frac{HSCTP \times CPN_4}{PN_7 + PN_8 - HSNTP} \quad (58)$$

$$HSNTA = \frac{HSNTP \times HSCTA}{HSCTP} \quad (59)$$

$$HPCTA = \frac{HPCTP \times CPN_5}{PN_9 - HPNTP} \quad (60)$$

$$HPNTA = \frac{HPNTP \times HPCTA}{HPCTP} \quad (61)$$

$$UND = CPN_6 \quad (62)$$

In fine tutti i compartimenti vengono aggiornati rispetto al contenuto di carbonio ed azoto in funzione delle trasformazioni reali che si sono verificati. Tale aggiornamento tiene conto del fenomeno della respirazione (RSPC) che porta alla formazione dei CO₂ dai differenti comparti. Il modello inoltre calcola ed aggiorna i movimenti nel terreno di carbonio e azoto organico dovuti al fenomeno della lisciviazione.

1.5.2.6 Dinamica della densità apparente nel modello EPIC

È noto che il contenuto di sostanza organica nel suolo è, normalmente, inversamente proporzionale alla densità apparente del terreno (DB). EPIC è in grado di calcolare, tramite una versione modificata dell'equazione di Adams (1973), i cambiamenti annuali della densità apparente dovuti ai cambiamenti nel contenuto di sostanza organica nel suolo:

$$DB = \begin{cases} \frac{100}{(SOC \times 1,724/0,244) + (100 - SOC \times 1,724)/DBm}; & 0 \leq SOC < 58 \text{ gCkg}^{-1} \times 10^{-1} \\ 0,244; & SOC = 58 \text{ gCkg}^{-1} \times 10^{-1} \end{cases} \quad (63)$$

Mentre la densità apparente della sostanza organica del suolo (DB) è generalmente costante (0,244 Mg m⁻³), per la densità apparente della frazione minerale del suolo (DBm) si ha una situazione opposta ed inoltre tale valore generalmente non è noto. Per risolvere questo problema EPIC stima la densità apparente della frazione minerale all'inizio della simulazione in base ai valori iniziali della densità apparente della sostanza organica e del contenuto di sostanza organica. I valori di DB sono poi aggiornati annualmente in base ai nuovi calcoli effettuati sulla sostanza organica di ogni strato del terreno aggiustando inoltre il valore calcolato in funzione della profondità dello strato di terreno considerato.

1.5.2.7 Gestione del carbonio e dell'azoto e altre caratteristiche di EPIC paragonate ad altri modelli per la simulazione della sostanza organica nel terreno

Come precedentemente detto il modello EPIC segue l'approccio basato sull'utilizzo di differenti pool utilizzato nel modello Century (Parton *et al.*, 1987, 1993, 1994) con le modifiche riportate nei paragrafi precedenti.

Da questo punto di vista EPIC e Century sono simili ad altri modelli per la simulazione della sostanza organica nel suolo come ad esempio ANDY (Franko *et al.*, 1995), DAISY (Hansen *et al.*, 1991), DSSAT (Gijssman *et al.*, 2002) e RothC (Jenkinson e Coleman, 1994; Coleman e Jenkinson, 1996) ma sia CANDY che RothC hanno, a differenza di EPIC, un pool inerte di sostanza organica nel suolo.

Così come Century, EPIC utilizza un solo pool per rappresentare la biomassa

microbica mentre ad esempio *ecosys* utilizza un approccio funzionale per rappresentare l'attività della componente microbica del suolo.

Caratteristiche peculiari di EPIC sono la capacità di stimare la perdita di carbonio organico del suolo a causa dell'erosione determinata dal vento o dall'acqua e la sua capacità di stimare i cambiamenti di densità apparente e profondità del terreno causati rispettivamente dai cambiamenti nel contenuto di sostanza organica e dall'erosione. In questo modo EPIC modifica le caratteristiche strutturali del terreno (densità, porosità e ritenzione idrica) in seguito al cambiamento degli elementi costituenti, come ad esempio il carbonio organico, permettendo l'avvio di meccanismi di feedback.

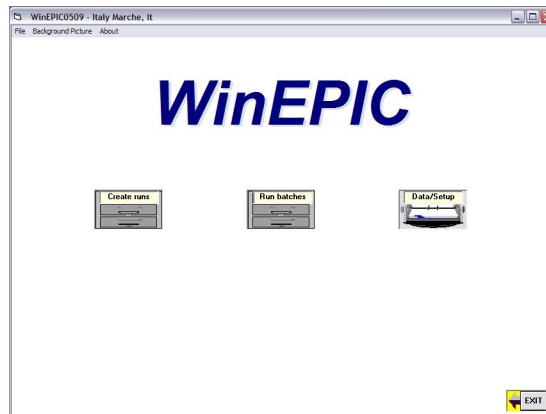
1.5.3 Il software WinEPIC

Oggi l'utilizzo del software EPIC è stato notevolmente semplificato grazie alla sua implementazione con un'interfaccia grafica funzionante con un sistema di finestre simile a quello del sistema operativo Windows[®]. Con tale configurazione il programma prende il nome di WinEPIC ed è stato progettato per poter includere diverse simulazioni capaci di analizzare gli effetti delle pratiche agricole e dei sistemi colturali sulle produzioni, sulla qualità del suolo e dell'acqua, sui processi di erosione da parte di acqua e vento e sul profitto (Gerik *et al.*, 2006).

Si riporta di seguito una breve descrizione delle principali "finestre" di WinEPIC.

Main Menu

In esso sono presenti tre "collegamenti" che consentono di accedere alle tre finestre principali del software: Create runs, Run batches e Data/Setup.



Finestra "Main Menu".

Create runs

La finestra "Create runs" permette di impostare le simulazioni andando a scegliere i criteri da utilizzare per ognuna di esse.

Finestra "Create Runs" con alcuni dati relativi alla simulazione per il sito oggetto di studio.

In questa finestra è richiesto l'inserimento dei dati che caratterizzano il sito per il quale viene effettuata la simulazione ed i criteri secondo i quali la simulazione dovrà esser effettuata. Si deve infatti selezionare:

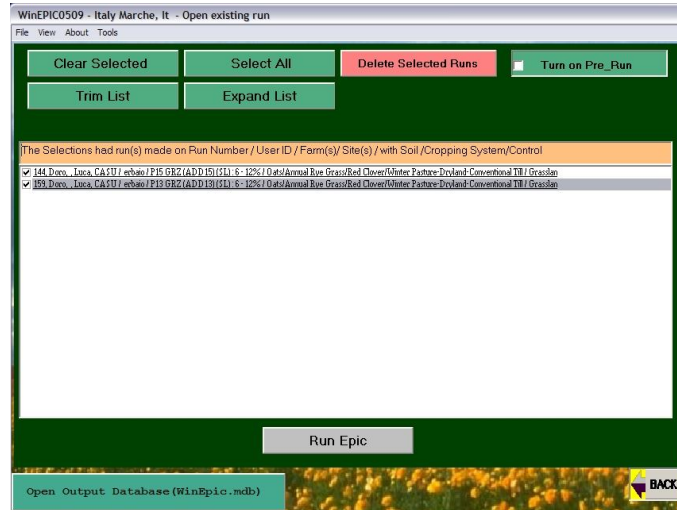
- ◆ il sito in cui viene effettuata la simulazione – *Site*. Informazione attraverso la quale vengono richiamate dal database le coordinate del sito, utilizzate dal software per il calcolo del numero di ore di luce e dell'altitudine;

- ◆ il tipo di suolo presente – *Soil*;
- ◆ i dati meteo da utilizzare per la simulazione – *Weather Station*;
- ◆ i criteri da seguire per la simulazione (contenuti nel "control table" selezionato) – *Control*;
- ◆ il sistema colturale sul quale effettuare la simulazione – *Cropping System*;
- ◆ la tipologia di lavorazione del terreno e la velocità di infiltrazione dell'acqua – *Land Condition*.

Una volta inseriti tutti i dati richiesti è possibile salvare le regole da noi impostate per quella specifica simulazione. Queste vengono comunemente identificate con il termine "Run" e al momento del salvataggio sono contraddistinte da un numero progressivo e dalla descrizione sintetica dei criteri impostati.

Run batches

La finestra "Run batches" permette di selezionare, fra tutte le Run precedentemente salvate, quella da utilizzare per la simulazione.

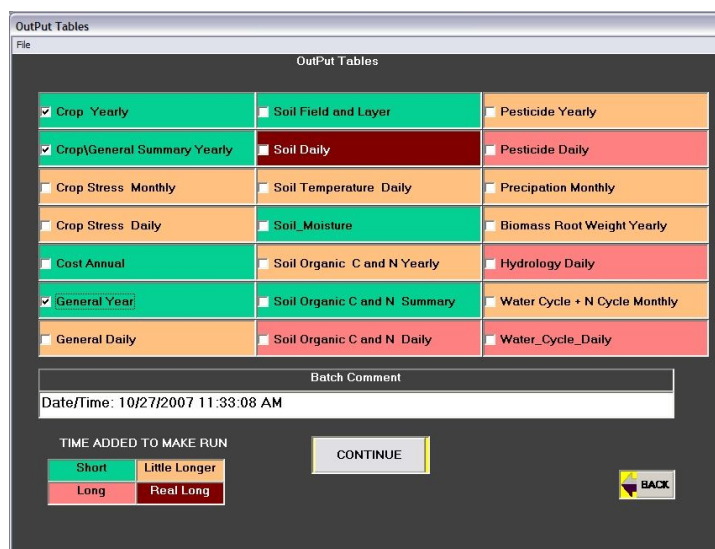


Finestra "Run Batches" tramite la quale è possibile selezionare le simulazioni per i differenti siti sperimentali.

E' possibile selezionare una o più Run ed eliminare quelle non più utili. E' inoltre possibile attivare la funzione di pre-simulazione di EPIC. Questa permette di realizzare una pre-simulazione che consente al modello di utilizzare i risultati ottenuti da tale simulazione come valori in input per effettuare la simulazione vera

e propria richiesta dall'utente. Durante la pre-simulazione avviene la stabilizzazione di tutte le dinamiche simulate dal modello EPIC come ad esempio quella della sostanza organica nel terreno.

Una volta selezionate le *Run* che si vogliono utilizzare per la simulazione, tramite il tasto "*Run Epic*" si accede alla pagina all'interno della quale l'utente può scegliere che tipo di simulazione effettuare e di conseguenza quali output potranno essere visualizzati al termine della simulazione stessa.



Finestra all'interno della quale è possibile selezionare il tipo di simulazione da effettuare.

Le possibili simulazioni (e di conseguenza gli output) riguardano:

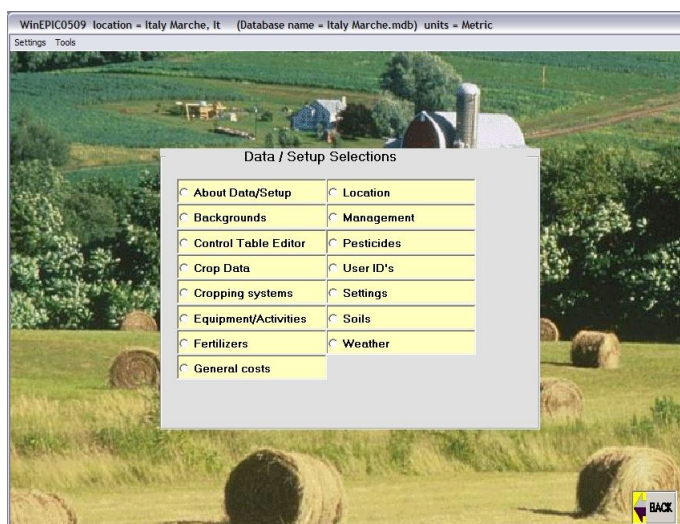
- ◆ informazioni generali con scala temporale annuale o giornaliera;
- ◆ informazioni generali sulla coltura, sulle produzioni e sugli stress subiti dalla stessa;
- ◆ informazioni sui costi annuali;
- ◆ varie informazioni sul suolo tra cui: la temperatura giornaliera, il contenuto idrico e il ciclo di carbonio ed azoto con scala temporale annuale, giornaliera o come media degli anni di simulazione;
- ◆ informazioni sul bilancio idrico;
- ◆ informazioni sui fitofarmaci;
- ◆ informazione sulla biomassa radicale.

La diversa colorazione della voci fa riferimento al tempo necessario al modello per effettuare la simulazione.

Terminata la selezione dei diversi tipi di simulazione che EPIC dovrà eseguire, tramite il tasto "*Continue*" viene avviato il processo di calcolo.

Data/Setup

La finestra "Data/Setup" permette di impostare diverse informazioni necessarie alla calibrazione del modello sul sito e sul sistema colturale oggetto di studio.



Finestra "Data/Setup" da cui è possibile accedere alle diverse sezioni del modello.

Attraverso questa finestra è possibile accedere alle diverse sub-finestre specifiche per i vari parametri che è possibile regolare per la creazione e impostazione della simulazione.

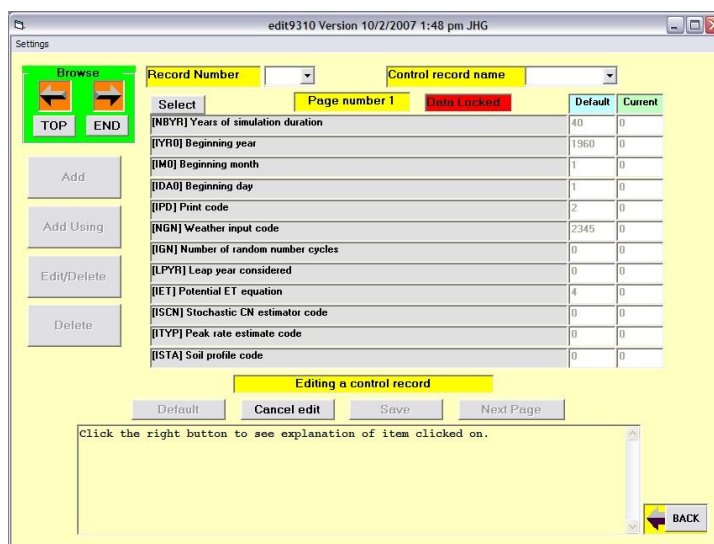
Il "*Control Table Editor*" consente di impostare i parametri che guideranno le simulazioni. Questi sono:

Codice	Nome	Descrizione
NBYR	Years of simulation duration	
IYRO	Beginning year	
IMO	Beginning month	
IDAO	Beginning day	
IPD	Print code	Specifica il formato temporale in cui saranno espressi gli output.
NGN	Weather input code	Specifica quali dati meteo sono forniti dall'utente e quali dovranno essere generati da EPIC.

IGN	Number of random number cycles	Genera un numero casuale associato alle condizioni climatiche di una determinata simulazione in modo da poter richiamare tali condizioni per le simulazioni future.
LPYR	Leap year considered	Considera l'anno bisestile
IET	Potential ET equation	Permette di selezionare l'equazione da utilizzare per la stima dell' ET_p .
ISCN	Stochastic CN estimator code	Selezione la tipologia di curva da utilizzare per la simulazione.
ITYP	Peak rate estimate code	
ISTA	Soil profile code	Determina se simulare l'erosione del terreno.
IHUS	Automatic heat unit scheduling	Tramite questo comando le operazioni colturali vengono effettuate una volta raggiunta un determinato valore di gradi giorno.
NCOW	Number of animals	Usato per la simulazione del pascolamento.
NWCN	Non – varying CN – CN2 used for all storms	
INFL	Runoff Q estimation methodology	Metodo di stima del ruscellamento.
LBP	Soluble phosphorus runoff estimate	Stima della perdita di fosforo solubile a causa del ruscellamento.
NSTP	Day to stop for realtime input option	
IGMX	Number of times generator seeds are initialized	Genera differenti scenari climatici per poter analizzare la distribuzione di fattori come ad esempio la produzione.
IERT	Enrichment ratio method for EPIC or GLEAMS	Permette di selezionare quale metodo utilizzare per la simulazione della concentrazione dei fitofarmaci nelle acque di ruscellamento.
ICG	Crop growth biomass conversion option	Permette di selezionare quale metodo utilizzare per la stima dell'accumulo di biomassa.
LMS	Lime application switch	Permette di selezionare la distribuzione automatica o meno di calce.
ICF	Erosion equation to use	Influenza il metodo di calcolo dell'erosione.
ISW	Field moisture and wilting point calculation method	Metodo da utilizzare per il calcolo dell'umidità del terreno e del punto di appassimento.
ICO2	Atmospheric CO2	Mantiene la concentrazione della CO ₂ nell'atmosfera, durante la simulazione, costante o meno.
RFNO	Average concentration of nitrogen in rainfall (ppm)	
CO2	CO2 concentration in atmosphere (ppm)	Concentrazione atmosferica della CO ₂ all'inizio della simulazione.
CNO3O	Conc. of NO3 in irrigation water (ppm)	
CSALT	Conc. of salt in irrigation water (ppm)	
PSTX	Pest damage scaling factor	Riduzione della produzione a causa di patogeni o insetti.

YWI	Number years of max. monthly .5 hour rainfall record	
BTA	Coeff. used to est. wet-dry prob. given month wet days	Usato per generare il clima in assenza di dati giornalieri sulla piovosità.
EXPK	Parameter used to modify exp. rain distribution	Usato per generare il clima in assenza di dati giornalieri sulla piovosità.
FL	Wind run lenght (km)	Da utilizzare per la simulazione dell'erosione causata dal vento.
FW	Wind run width (km)	Da utilizzare per la simulazione dell'erosione causata dal vento.
ANG0	Clockwise angle of field length from north	Da utilizzare per la simulazione dell'erosione causata dal vento.
STD0	Stending dead crop residue (t/ha)	Specifica la presenza di residui colturali.
UXP	Power parameter of modified exp. dist of wind speed	
DIAM	Soil particle diameter (UM)	Influenza l'erosione causata dal vento.
ACW	Wind erosion control factor	Regola il processo di erosione causata dal vento.
BIR	Irrigation trigger	Permette di selezionare la modalità secondo la quale effettuare l'irrigazione.
EFI	Runoff volume/volume irrigation water applied	Frazione dell'acqua distribuita per l'irrigazione persa per ruscellamento.
WIMX	Max annual irrigation volume allowed (mm)	
ARMN	Min singol application volume allowed (mm)	
ARMX	Max singol application volume allowed (mm)	
BFT0	Auto fertilizer trigger	Permette di selezionare la modalità secondo la quale effettuare la concimazione.
FNP	Fert. application variable	Seleziona la modalità da adottare per determinare il quantitativo di concime distribuito automaticamente.
FMX	Max annual fertilizer application (kg/ha)	
DRT	Time required for drainage system to reduce plant stress	Da utilizzare solamente in presenza di un sistema di drenaggio.
FDS0	Furrow dike safety factor	Influenza l'acqua disponibile nel terreno.
PEC	Water erosion control practice factor	Da utilizzare per simulare l'erosione causata dall'acqua.
VLGN	Lagoon volume ratio	
COWW	Lagoon input from wash water	Acqua immessa nella laguna e proveniente dal lavaggio della sala di mungitura.
DDLG	Time to reduce lagoon storage from max to norm	
SOLQ	Ratio – liquid / total manure applied	
GZLM	Above ground plant material grazing limit (t/ha)	Limite al di sotto del quale viene sospeso il pascolo.
FFED	Fraction of time herd in feeding area	Frazione della giornata in cui gli animali non sono al pascolo.

DRV	Equation for water erosion	Seleziona l'equazione da utilizzare per la stima dell'erosione causata dall'acqua.
BUS1	1 st input parm for MUSI	Parametro da utilizzare nell'equazione MUSI per la stima dell'erosione.
BUS2	2 nd input parm for MUSI	Parametro da utilizzare nell'equazione MUSI per la stima dell'erosione.
BUS3	3 rd input parm for MUSI	Parametro da utilizzare nell'equazione MUSI per la stima dell'erosione.
BUS4	4 th input parm for MUSI	Parametro da utilizzare nell'equazione MUSI per la stima dell'erosione.



Finestra di esempio del "Control Table".

È possibile salvare più *Control Table* con impostazioni differenti in modo tale da simulare vari scenari o tecniche colturali.

La finestra "*Crop Data*" permette di modificare i diversi parametri, suddivisi in categorie, per tutte le colture presenti nel database di EPIC.

La finestra "*Cropping System*" permette di selezionare o creare un sistema colturale per il sito su cui viene effettuata la simulazione. Il sistema colturale è definito come una combinazione di diverse colture in rotazione.

Tramite la finestra "*Equipment/Activities*" è possibile modificare diverse attività colturali o di utilizzo del sistema colturale.

Le diverse voci presenti sono:

- ◆ lavorazioni – *Plow/Cultivate/Other*;
- ◆ raccolta – *Harvest*;
- ◆ caratteristiche dei trattori – *Tractor*;
- ◆ semina – *Plant*;
- ◆ fitofarmaci – *Pesticide*;
- ◆ irrigazione – *Irrigate*;
- ◆ concimazione – *Fertilize*;
- ◆ imballatura e legatura – *Bagging and Ties*;
- ◆ sgranatura (riferita al cotone) – *Ginning*;
- ◆ trasporto – *Hauling*;
- ◆ essiccazione della granella – *Grain Drayning*;
- ◆ pascolamento – *Grazing*;
- ◆ copertura con materiali plastici – *Plastic Cover*;
- ◆ funzionamento del raschiatore per l'allontanamento delle deiezioni animali dalla stalla – *Manure Scraper*.

Le varie finestre delle singole voci sono molto simili tra loro, a titolo di esempio si riporta la finestra relativa alle lavorazioni.

WinEPIC0509 location = Italy Marche, it (Database name = Italy Marche.mdb) - Setup - Edit tillage units = METRIC, dollars = US

File Settings Tools

Editing: Plow/cultivate/other - Activity #: 217 (HC: 0)

Default activity name: PLOW, MOLDBOARD 3 BOTTOM
Current activity name: PLOW, MOLDBOARD 3 BOTTOM

Physical				Economic			
Description	Default	Current	New	Description	Default	Current	New
Type	NON	NON		Purchase price(\$)	3.887	3.887	
Power of Unit(KW)	0.0	0.0		Initial list price in current(\$)	4.187	4.187	
Width of pass(m)	1.2	1.2		Annual use (H)	100	100	
Operation speed(km/h)	7.2	7.2		Life of Equip (H)	2000	2000	
Fraction Mixing efficiency	0.95	0.95		Repair cost coef 1	0.29	0.29	
Random surface roughness(mm)	30.00	30.00		Repair cost coef 2	1.8	1.8	
Tillage depth(mm)	150.00	350.00		Lubricant factor	0.1	0.1	
Ridge Heigh(mm)	0.00	0.00		Fuel consumption multiplier	0	0	
Ridge interval(m)	0.0	0.0		Remaining farm value parm 1	0.6	0.6	
[Not Used]	0	0		Remaining farm value parm 2	0.885	0.885	
[Not Used]	0.0	0.0		Annual real interest (\$/%)	0	0	
Fraction plant pop. reduced by oper.	0	0					
Fraction runoff from Irrigation ops	0.00	0.00					
Fraction Machine efficiency	0.8	0.8					
Type of Irr. Distribution system	0	0					
Height of furrow dikes(mm)	0	0					
Distance between furrow dikes(m)	0	0					
Fraction of soil compacted	0	0					

Default

BACK

Finestra per la modifica dei parametri relativi alle lavorazioni.

La finestra risulta suddivisa in due parti ben distinte: sulla sinistra sono riportate le voci di tipo dimensionale o fisico, mentre sulla destra sono riportate le voci di tipo economico. Alcune caratteristiche delle macchine operatrici, come ad esempio la larghezza di lavorazione, la velocità di avanzamento, la profondità di lavorazione e l'efficienza di rimescolamento del terreno, possono essere modificate inserendo i nuovi valori nelle apposite celle.

La finestra relativa ai fertilizzanti (*Fertilizer*), come quella relativa ai sistemi colturali, permette di selezionare e modificare i concimi presenti nel database di EPIC.

Nella finestra dei costi generali (*General costs*) sono riportati i valori di base per alcune voci di spesa facenti riferimento ad alcune attività necessarie per la gestione aziendale.

La finestra "*Location*" permette all'utente di inserire varie informazioni come ad esempio il nome, l'indirizzo le coordinate geografiche e altre informazioni riguardanti la località oggetto di studio.

Tramite la finestra "*Management*" è possibile modificare un sistema colturale esistente o crearne di nuovi.

È possibile creare sistemi colturali utilizzando:

- ◆ da una a quattro colture a ciclo annuale in rotazione;
- ◆ una consociazione tra due colture annuali;
- ◆ una coltura annuale e una coltura utilizzata come "cover crop";
- ◆ da una a quattro colture a ciclo poliennale.

La finestra relativa ai fitofarmaci (*Pesticides*) permette anch'essa la selezione e la modifica dei singoli prodotti presenti nel database di EPIC.

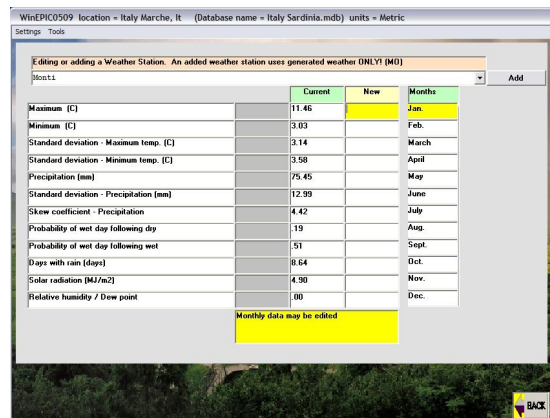
La finestra "*User IDs*" consente di inserire le informazioni riguardanti i diversi utilizzatori del software WinEPIC nel medesimo computer.

La finestra "*Setting*" permette di scegliere e di selezionare il database da utilizzare, le unità di misura (Sistema Internazionale o anglosassone) e la versione di Microsoft Office installata sul computer, che sarà poi utilizzata per mostrare gli output delle simulazioni a anche dal programma Weather Analyzer facente parte di WinEPIC.

La finestra relativa alle informazioni di tipo pedologico del sito oggetto di studio (*Soils*), permette di creare nuovi tipi di suolo e di inserirne le caratteristiche in modo da rappresentare le differenti situazioni riscontrabili.

Una volta selezionato un suolo è possibile modificarne alcune caratteristiche come ad esempio la densità apparente, il pH, lo spessore dei diversi orizzonti che lo costituiscono, la capacità di campo ed il punto di appassimento, la percentuale di scheletro, la tessitura e la presenza di diversi macroelementi.

La finestra "*Weather*", facente riferimento al clima, permette di selezionare, tra quelle presenti nel database, la "stazione meteo" da cui prendere le informazioni climatiche per la simulazione. È possibile modificare i dati delle stazioni inserendo manualmente i valori medi mensili per tutte le voci presenti nella scheda.



Finestra "Weather". Permette la visualizzazione dei valori medi mensili delle variabili meteorologiche.

Cliccando sul tasto "Add" è possibile creare una nuova stazione meteo semplicemente introducendo negli appositi spazi i valori medi mensili per tutte le voci riportate in tabella. In questo modo viene creata una nuova stazione che verrà salvata nel database di EPIC. In alternativa è possibile creare una nuova stazione meteo partendo da dati meteorologici giornalieri e utilizzando il programma "CropMan Weather Analyzer" facente parte del pacchetto WinEPIC.

Sempre tramite la finestra "Data/Setup", cliccando sul menu "Tools" è possibile aprire la finestra "Parm Editor", questa permette di impostare i valori di diversi parametri i quali rimarranno costanti per tutte le simulazioni che verranno create successivamente.

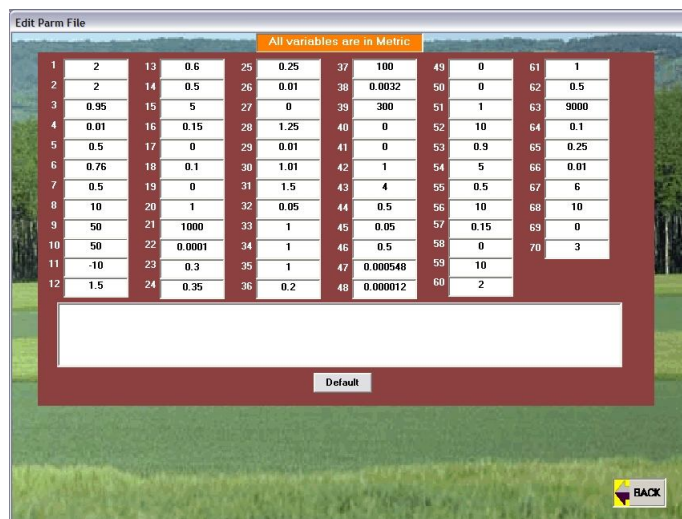
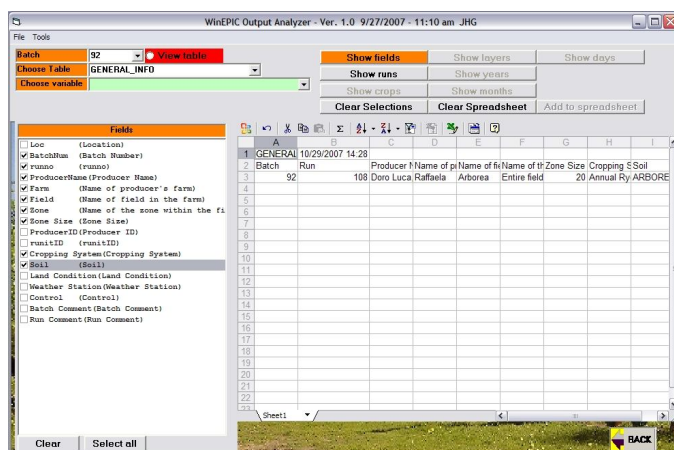


Immagine di esempio della finestra "Parm Editor".

Tramite la modifica dei parametri presenti in questa finestra e di quelli di alcune delle altre schede precedentemente descritte (es. Crop Data ed Equipment/Activity) è possibile procedere alla calibrazione del modello sul sito e sul sistema colturale oggetto di studio.



Finestra per la visualizzazione dei dati derivanti dalle simulazioni.

In WinEPIC, i dati derivanti dalle simulazioni possono essere visualizzati secondo due modalità: accedendo direttamente al database del programma o utilizzando la forma personalizzata di presentazione dei risultati. È possibile accedere al

database in due modi differenti: dalla cartella principale del programma o in alternativa utilizzando il tasto di collegamento "Open Output Database (WinEpic.mdb)" presente della schermata "Run batches". È inoltre possibile accedere alla visualizzazione personalizzata dei dati in output attraverso il tasto di collegamento "View customized output" che compare nella schermata "Run batches" dopo aver eseguito una simulazione. In questa schermata è possibile scegliere che tipologia di dati visualizzare (es. informazioni sull'azienda o sulla coltura, sugli stress subiti dalla coltura, sull'idrologia del suolo, sul suolo e sugli orizzonti in esso individuati e sulla dinamica di carbonio e azoto nel terreno) e, all'interno di queste, quali dati visualizzare. I valori scaturiti dalla simulazione vengono presentati in forma di foglio di calcolo nella finestra stessa e da qui, con un apposito comando, possono essere esportati direttamente in un foglio elettronico per le eventuali elaborazioni.

2 OBIETTIVI DI STUDIO

L'attività svolta durante il dottorato di ricerca rientra all'interno del progetto di ricerca nazionale "Cambiamenti Climatici e Sistemi Produttivi Agricoli e Forestali: Impatto sulle Riserve di Carbonio e sulla Diversità Microbica del Suolo" (SOILSINK). Il progetto si colloca nell'ambito delle ricerche finalizzate allo studio della dinamica della sostanza organica del suolo ed all'individuazione delle strategie di gestione agronomica finalizzate all'attenuazione dell'incremento di concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera grazie all'aumento delle capacità di C-sink del suolo.

La ricerca condotta ha avuto numerosi obiettivi, il primo dei quali è stato quello della caratterizzazione pedologica, bioclimatica, vegetazionale ed agronomica delle aree oggetto di studio, in relazione allo studio dell'impatto di diversi usi del suolo in situazioni pedologiche e bioclimatiche ben definite e per poter successivamente estendere i risultati ottenuti ad aree con caratteristiche pedologiche e bioclimatiche paragonabili.

Nell'ambito del dottorato, obiettivo specifico è stato lo studio dell'influenza della gestione agronomica delle superfici a destinazione foraggera sulla ripartizione e dinamica della sostanza organica del suolo, con particolare attenzione allo studio dell'influenza esercitata dalla frequenza di lavorazione. L'approccio a tale problematica ha previsto l'impiego di un modello di simulazione.

Utilizzando lo strumento delle simulazioni, ulteriore obiettivo è stato lo studio degli effetti di scenari climatici futuri sulla produttività delle aree a destinazione foraggera e sull'evoluzione della sostanza organica del suolo per le tipologie di uso suolo considerate.

L'importanza di tale obiettivo deriva dal fatto che le condizioni meteorologiche influenzano direttamente sia l'immobilizzazione della sostanza organica che la produzione la quale a sua volta ha un ruolo diretto sul quantitativo di sostanza organica apportato al sistema.

Il modello di simulazione EPIC nel corso degli anni è stato utilizzato per lo studio di numerosi processi che vanno dallo studio dell'erosione causata dal vento e dall'acqua, per il quale è stato realizzato il modello EPIC, a studi sulle rese delle

colture o riguardanti gli effetti del mutamento climatico sulla produttività di alcune specie coltivate arrivando sino ad aspetti di estrema attualità come il ciclo degli elementi nutritivi e la loro lisciviazione nel suolo o l'immobilizzazione del carbonio nel terreno. Su quest'ultimo aspetto molteplici sono gli studi condotti tramite l'utilizzo del modello EPIC ma la maggior parte di questi sono stati condotti in diverse regioni degli Stati Uniti o dell'America del sud. Il presente lavoro rappresenta probabilmente il primo utilizzo del modello EPIC per lo studio della dinamica della sostanza organica nel suolo in ambiente mediterraneo.

3 MATERIALI E METODI

3.1 INDIVIDUAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA DI STUDIO

Preliminarmente all'individuazione dell'area di studio è stata condotta una ricerca sul territorio regionale con l'obiettivo di individuare il substrato pedologico maggiormente rappresentativo.

La scelta è caduta sulle formazioni intrusive paleozoiche (graniti) le quali interessano circa un terzo della superficie territoriale della Sardegna. All'interno di questa prima grande area sono state delimitate delle aree omogenee dal punto di vista climatico, pedologico e caratterizzate dalla stessa vegetazione potenziale. Successivamente, nell'ambito di queste aree è stata presa in considerazione, oltre alla vegetazione spontanea, la presenza di sistemi colturali differenziati per intensità d'uso (es.: foresta, pascolo, seminativo asciutto) e che da almeno 10 - 15 anni non abbiano subito sostanziali modifiche nelle pratiche agronomiche normalmente adottate. La stabilità dei sistemi colturali per tale periodo di tempo è stato ritenuto un requisito fondamentale per l'individuazione delle aree di studio in relazione allo studio della dinamica dei principali processi di ricambio del C nel suolo in condizioni di equilibrio.

Attraverso l'adozione dei suddetti criteri è stata individuata un'area di studio relativamente omogenea dal punto di vista geologico e morfologico ricadente tra i comuni di Monti (OT) e Berchidda (OT) e rappresentata dal bacino idrografico le cui acque affluiscono nell'invaso del Coghinas.

All'interno di tale vasta area di studio sono state individuate le seguenti tipologie di uso suolo in ordine crescente di intensità:

1. bosco di sughera;
2. vigneto abbandonato da circa 30 anni e con ripristino in corso della vegetazione naturale;
3. pascolo naturale;
4. erbaio costituito da un miscuglio di specie graminacee e leguminose;
5. vigneto con inerbimento naturale;
6. vigneto lavorato (non inerbito).

Per ciascuna tipologia sono stati successivamente individuati i campi in cui sono state realizzate le unità sperimentali sulle quali è stata condotta la ricerca.

3.1.1 Caratterizzazione meteorologica e climatologica

L'attività di caratterizzazione dell'area di studio è stata condotta in collaborazione con il Dipartimento di Botanica dell'Università degli Studi di Sassari.

3.1.1.1 Analisi bioclimatica dell'area di studio

Per la raccolta delle informazioni di tipo meteorologico relative all'area di studio, è stata individuata la stazione meteorologica appartenente al S.A.R. ed ubicata nel territorio di Monti 32T 527550 4517357 (UTM 32) la quale dista in linea d'aria circa 3 km dai campi sperimentali.

Per ottenere le informazioni di tipo meteorologico necessarie è stata realizzata, grazie ai dati forniti sia dal S.A.R. che dal Servizio Idrografico dell'Assessorato ai Lavori Pubblici, una serie storica che copre un periodo di circa 30 anni (dal 1976 al 2008). I dati così acquisiti sono stati organizzati in un database e successivamente sottoposti a controllo di qualità in relazione all'individuazione di eventuali dati mancanti o falsati da possibili errori di trascrizione.

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

Di seguito sono riportati gli andamenti delle temperature massime e minime medie annue e delle precipitazioni totali annue relativi alla serie storica trentennale (1976-2006) della stazione meteorologica di Monti (Figura 3.1 e 3.2).

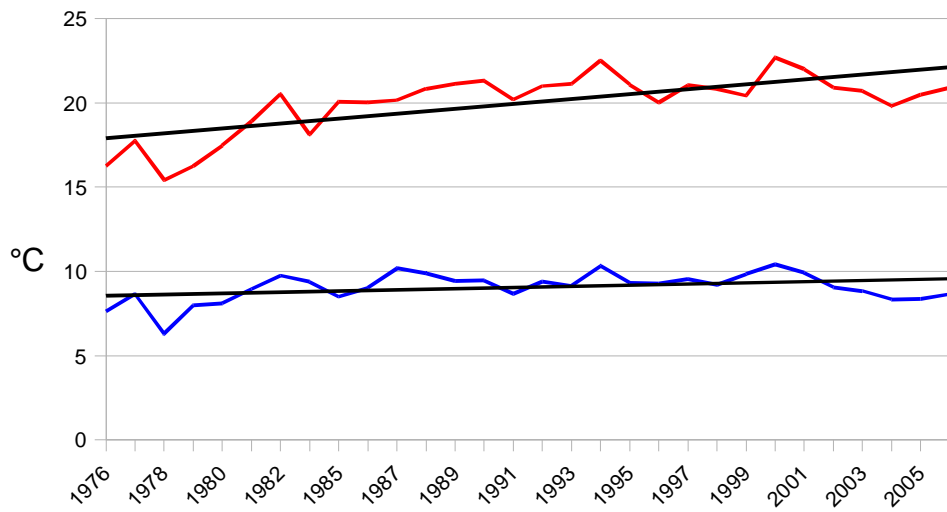


Figura 3.1 – Serie storica (1976-2006) stazione meteorologica di Monti: andamento delle temperature massime e minime medie annuali.

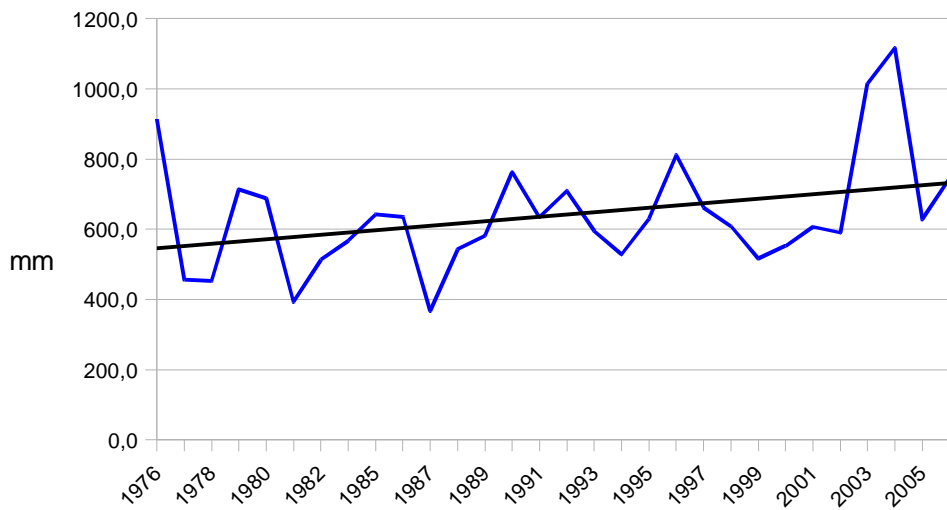


Figura 3.2 - Serie storica (1976-2006) stazione meteorologica di Monti: andamento delle precipitazioni totali annue.

3.1.1.2 Creazione file meteorologico di input per il modello EPIC

I dati richiesti dal modello EPIC ed estrapolati dalla serie storica appositamente realizzata sono stati:

- radiazione netta (MJ);
- temperatura massima (°C);
- temperatura minima (°C);
- pioggia (mm);
- umidità relativa (%);
- velocità del vento (m/s).

Queste informazioni sono richieste dal modello EPIC in formato giornaliero.

La gestione dei dati meteorologici da parte di EPIC avviene grazie alla creazione di una nuova "Weather Station" che si aggiungerà a quelle presenti di default nel modello e che conterrà i dati in input relativi al clima dell'area oggetto di studio.

Il primo passo per la creazione della "stazione meteorologica" a cui farà riferimento EPIC per la simulazione è la compilazione di un file Excel dove in apposite colonne saranno riportati i valori giornalieri delle variabili richieste. Al termine di questa operazione il file dovrà essere salvato in forma di testo delimitato da tabulazione (*.txt). A questo punto per continuare la creazione del file meteo con i dati giornalieri utilizzato da EPIC è necessario utilizzare il software Weather Analyzer. Tramite tale software è possibile effettuare la conversione del file *.TXT precedentemente creato nel formato .DLY che sarà utilizzato da EPIC durante la simulazione. Una volta generato tale file questo potrà essere sottoposto ad un controllo sfruttando una apposita utility presente nel software "Weather Analyzer". Questa procedura aiuta a individuare, e a correggere, eventuali errori presenti nel file evidenziando gli eventuali valori fuori scala, i valori mancanti o se un valore di temperatura massima è minore di quello di temperatura minima. Una volta completato il controllo del file è possibile passare alla creazione della stazione meteo che sarà immessa nel database di EPIC.

3.1.2 Caratterizzazione floristica e vegetazionale

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, effettuate durante tutto l'arco dell'anno al fine di realizzare elenchi floristici il più possibile esaustivi, hanno consentito di censire nell'area di studio 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 rinvia dal piano termo-mediterraneo al supra-mediterraneo da semi-arido 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-Quercu 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 3.1).

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 3.1 - 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 e per la identificazione di idonei parametri per la calibrazione dei modelli di simulazione del ciclo del carbonio nel suolo.

Una sintesi dei risultati ottenuti e relativi al sito con prevalente uso del suolo a pascolo è riportata nella tabella 3.2.

Tabella 3.2 – 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

3.1.3 Caratterizzazione pedologica e raccolta dati pedologici

Nell'ambito del progetto "SOILSINK" la caratterizzazione 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. Inoltre le analisi fisico - chimiche dei campioni di terreno prelevati, necessarie all'ottenimento delle informazioni fondamentali per il funzionamento del modello, sono state effettuate presso i laboratori dello stesso Dipartimento.

3.1.3.1 Caratterizzazione pedologica

Nell'area di studio il substrato pedogenetico è costituito da graniti con cristalli a grana media, interessati dalla presenza localizzata di filoni di quarzo e di porfidi.

La morfologia varia dalla ondulata alla pianeggiante. I processi di erosione idrica incanalata sono evidenti solo in alcuni uso del suolo caratterizzati da pendenze superiori al 15% circa (es. erbaio) e/o caratterizzati da scarsa copertura vegetale come rilevato nel vigneto abbandonato.

Nel corso del primo anno di attività in tutte le unità sperimentali individuate sono stati aperti, descritti e campionati un totale di 25 profili. All'interno dei differenti usi del suolo, individuati in funzione della loro intensità d'uso, tali profili sono stati aperti in funzione di:

- ◆ variazioni di morfologia all'interno delle aree di saggio;
- ◆ tipo di copertura vegetale;
- ◆ aree sottochioma o fuorchioa esclusivamente per il pascolo, sughereta ed erbaio.

Di seguito si riporta il numero degli studi del profilo del suolo condotti per ogni tipologia di uso individuata (Figura 3.3):

- vigneto non inerbito, 4 profili;
- vigneto inerbito, 3 profili;
- erbaio, 5 profili;
- pascolo naturale, 4 profili;
- bosco di sughera;

- vigneto abbandonati con ripristino in corso della vegetazione naturale, 7 profili.

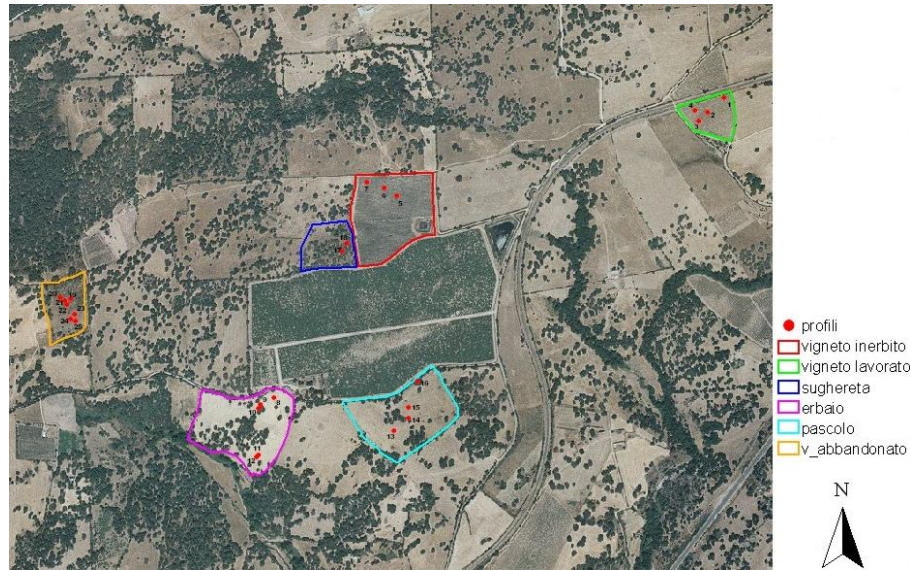


Figura 3.3 - Ubicazione dei profili scavati nell'area di studio.

Tali studi del profilo sono stati realizzati facendo ricorso ad un piccolo escavatore il quale ha permesso di giungere con maggiore facilità sino agli orizzonti pedologici più profondi (Figura 3.4).

Grazie all'apertura dei profili pedologici è stato possibile analizzare la stratigrafia del suolo ed effettuare i campionamenti, per ogni orizzonte pedologico individuato, necessari per la conduzione delle analisi fisico chimiche del



Figura 3.4 - Fase di apertura di un profilo pedologico.

terreno e per la determinazione della densità apparente del suolo. In questo modo è stato possibile ottenere le numerose informazioni di tipo pedologico richieste dal modello come dati in input.

Dall'analisi dei profili è emerso che tutti hanno presentato una successione di orizzonti del tipo A-Bw-C o A-Bw-BC-C mentre più rara è stata la successione del tipo A-Bw-R. La potenza dei profili, limitatamente agli orizzonti A e Bw, ha variato da un minimo di 0,38 m sino a d un massimo di 1,0 m. In alcuni dei profili

scavati il passaggio tra gli orizzonti A e Bw ed il substrato alterato è risultato graduale per via della presenza di un orizzonte BC caratterizzato da una tessitura grossolana e con spessore che ha variato da un minimo di 0,30 m ad un massimo di 0,90 m. Il contatto diretto con la roccia madre inalterata (orizzonte R) è stato osservato esclusivamente in 2 dei 25 profili scavati.

In base alle analisi fisiche effettuate è emerso che nell'area di studio le classi tessiturali prevalenti sono le sabbioso-franca e la franco-sabbiosa. Tessiture franco-sabbioso-argillose sono state osservate esclusivamente nell'orizzonte Bw del profilo indicato dal numero 18 e nell'orizzonte BC del profilo 16 dove, inoltre, è stato registrato un contenuto di argilla pari al 20,3%, corrispondente al più alto valore osservato fra tutti i campioni analizzati.

Le analisi effettuate per la caratterizzazione dell'area di studio hanno evidenziato che il contenuto di sostanza organica negli orizzonti A non è molto elevato facendo registrare un valore medio intorno al 3%. Sempre relativamente al contenuto di sostanza organica i valori più alti (8,6% e 11,8%) sono stati osservati nell'orizzonte più superficiale dei due profili scavati all'interno della sughereta.

Le analisi chimiche hanno evidenziato che 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 e 7, scavati nel vigneto inerbito, il profilo 8 aperto nel pascolo ed il 21 aperto nel vigneto abbandonato con una copertura vegetale costituita da macchia a cisto molto fitta. I profili caratterizzati da un 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 Dystrocherepts* (Key to Soil Taxonomy, 2006). I restanti sono stati classificati come *Typic Haploxerepts*. Secondo il WRB (2006) classificabili rispettivamente come *Haplic Endoleptic Cambisols (Dystric)* e *Haplic Endoleptic Cambisols (Eutric)*.

Per quanto riguarda la tassonomia dei suoli possiamo dire che 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.

Si è deciso di fare ricorso al Soil Taxonomy e, per le correlazione con le altre tassonomie, al WRB.

Nell'area Berchidda sono diffusi suoli di media potenza, sviluppatasi 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, per quanto riguarda le temperature, in base alle temperature medie ed annuali, è stato attribuito il regime *termico* caratterizzato da una temperatura media annua del suolo compresa tra 15°C e 22°C e 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 Dystroxerepts*, sottogruppo in cui sono ascritti tutti i *Dystroxerepts* le cui caratteristiche chimiche e fisiche corrispondono a quelle considerate come tipiche del sottogruppo.

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 di studio di Berchidda 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.

3.1.3.2 Raccolta delle informazioni pedologiche richieste dal modello

Su tutti i 25 profili aperti nell'area di studio sono state raccolte numerose informazioni in base a quanto richiesto dal modello di simulazione EPIC

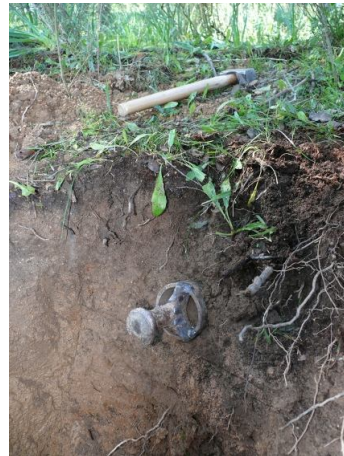
Le informazioni di tipo pedologico raccolte grazie all'escavazione dei profili, e richieste dal modello EPIC, sono state:

- la profondità del terreno;
- il numero degli orizzonti individuati;
- la loro tipologia;
- il loro spessore.

Inoltre è stato prelevato per ogni orizzonte un campione di terreno necessario per eseguire le analisi fisico chimiche, ed è stata determinata, sempre per ogni

orizzonte, la densità apparente mediante apposito campionamento.

I campioni destinati alla determinazione della densità apparente di ogni orizzonte sono stati prelevati seguendo la metodologia del carotaggio la quale prevede la collezione di campioni di suolo per mezzo di carotatori di volume noto i quali possono essere gestiti sia manualmente che assistiti da un sistema idraulico. La massa volumica apparente viene calcolata, una volta essiccato il campione in stufa e pesato, secondo quanto indicato dalla metodologia ufficiale (Suppl. Ord. n.173 alla G.U. n.204 del 2/9/1997). Tali campioni sono stati prelevati inserendo il cilindro orizzontalmente nel terreno in corrispondenza della parte mediana di ciascun orizzonte e sino al suo completo riempimento. Successivamente il cilindro veniva estratto dal terreno (facendo ricorso in alcuni casi ad uno scalpello data l'estrema compattezza del suolo) e la carota di terreno estratta, trattenuta all'interno del cilindro, veniva portata al livello dei margini del cilindro stesso. Il terreno presente dentro il cilindro veniva quindi estratto e posto in buste di plastica per il suo trasporto in laboratorio. A causa dell'estrema tenacità del terreno in alcuni profili non è stato possibile effettuare tale campionamento negli orizzonti più profondi (BC e C) caratterizzati da una aggregazione delle particelle particolarmente elevata.





Nella sequenza fotografica (figura 3.5– 3.11) sono riportate alcune fasi del campionamento di terreno per la determinazione della densità apparente.

La procedura seguita per la determinazione della densità apparente del terreno è stata la seguente. Una volta in laboratorio i campioni sono stati posti in stufa ad una temperatura di 105°C per la completa eliminazione dell'acqua e, una volta raggiunta la stabilità del loro peso, sono stati sottoposti alla pesatura.

A questo punto si è proceduto ad un primo calcolo della densità apparente (ρ_a) mediante la formula:

$$\rho_a = \frac{m_s}{V_t}; \quad [kg\ m^{-3}]$$

dove: m_s = massa della frazione solida

V_t = volume totale del campione

Data la grande quantità di scheletro presente nei campioni è stata effettuata la correzione dei dati di densità apparente al fine di considerare il contenuto di scheletro presente in ogni campione.

Tale correzione è stata effettuata secondo le seguenti relazioni:

$$\rho_{asc} = P_{scs} / V_{scs} \quad [kg\ m^{-3}]$$

dove: ρ_{asc} è la densità apparente dello scheletro; P_{scs} è il peso secco dello scheletro e V_{scs} il suo volume.

Il peso del campione senza scheletro (P_{sf}) è:

$$P_{sf} = P_{ss} - P_{scs} \quad \text{dove: } P_{ss} = \text{peso secco del campione di suolo}$$

il volume del campione senza scheletro (V_{sf}) è:

$$V_{sf} = V_s - V_{scs} \quad \text{dove: } V_s = \text{volume del campione di suolo}$$

Di conseguenza la densità apparente del campione senza scheletro (ρ_{asf}) sarà:

$$\rho_{asf} = \frac{(P_{ss} - P_{scs})}{(V_s - V_{scs})}; \quad [kg\ m^{-3}]$$

Dato che: $V_{scs} = P_{scs} / \rho_{asc}$

sostituendo si ottiene che la densità apparente del campione senza scheletro è definita da:

$$\rho_{asf} = \frac{(P_{ss} - P_{scs})}{[V_s - (P_{scs} / \rho_{asc})]}; \quad [kg\ m^{-3}]$$

3.1.4 Caratterizzazione agronomica e raccolta dati relativi alla serie di vegetazione

Nell'ambito dell'area di studio Berchidda 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 del bacino oggetto 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 campi sperimentali, ed in modo particolare sul pascolo e sull'erbaio, è stata condotta la caratterizzazione agronomica.

La prima fase dell'attività di caratterizzazione ha previsto la conduzione di numerose interviste rivolte ai proprietari e gestori delle superfici. Tali interviste sono state reiterate nel tempo in relazione ad un crescente grado di approfondimento delle informazioni acquisite. 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 inerenti la gestione presente quali ad esempio il carico di bestiame, il piano di concimazione adottato etc.

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).

Le informazioni ottenute tramite le interviste sono riportate in forma sintetica nelle schede riportate.

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 causate da crittogame.

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 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 esclusivamente 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 trattamenti 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 avente 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 nelle settore nord e vernaccia nel settore sud.

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

Distanze di impianto impianto: 1,50 ÷ 1,80 × 1 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.

Relativamente agli usi suolo a prevalente utilizzo come erbaio e pascolo, sono state raccolte, sia tramite interviste degli agricoltori che grazie alla conduzione di rilevazioni in campo, numerose informazioni.

3.1.4.1 Acquisizione dei dati agronomici richiesti dal modello tramite interviste

Le informazioni ottenute tramite intervista hanno riguardato:

1. Le lavorazioni effettuate per la preparazione del letto di semina. Per tale operazione, effettuata dal proprietario del terreno mediante l'utilizzo di un aratro a dischi, è stata acquisita la data in cui normalmente tale operazione viene effettuata e la profondità alla quale è eseguita. Quest'ultimo

parametro assume particolare importanza in quanto modifica la densità apparente del suolo sino alla profondità raggiunta dalla lavorazione, incorpora i residui colturali e ridistribuisce gli elementi nutritivi all'interno dello strato lavorato. Inoltre va ad influire sul ciclo degli elementi nel terreno tra i quali anche il carbonio.

2. La semina, acquisendo le date in cui normalmente viene effettuata tale operazione e il quantitativo di seme impiegato (avena: 1 q ha⁻¹, loglio: 30 kg ha⁻¹, trifoglio: 25 kg ha⁻¹).
3. Le lavorazioni secondarie, effettuate per l'affinamento del letto di semina. Anche per tale operazione è stato individuato il tipo di macchina operatrice utilizzata (erpice a denti rigidi), la profondità di lavorazione ed il momento in cui, generalmente, tale operazione viene effettuata.
4. La concimazione. Per tale operazione è stato individuato il fertilizzante utilizzato e sono state acquisite informazioni riguardanti le dosi e le date di impiego.
5. La gestione del pascolamento. In questo caso sono state acquisite informazioni relative alle date di avvio e conclusione del pascolamento sulle superfici in studio, nonché la durata giornaliera del pascolamento ed il carico istantaneo per unità di superficie.
6. La raccolta del foraggio (esclusivamente per l'erbaio), acquisendo informazioni sulla data in cui normalmente tale operazione viene effettuata e sulle modalità con cui la raccolta viene effettuata (macchina operatrice utilizzata e altezza di taglio).

3.1.4.2 Acquisizione diretta dei dati agronomici richiesti dal modello

Per la raccolta delle informazioni agronomiche è stato effettuato un monitoraggio dell'andamento della crescita e sviluppo delle colture nel tempo.

In entrambe i sistemi colturali le rilevazioni dirette sono state condotte su 10 aree di campionamento della superficie di 1/16 di m² (pari a 625 cm²). Tali campionamenti sono stati condotti nelle immediate vicinanze dei profili individuati come maggiormente rappresentativi per ciascuna tipologia di uso

suolo.

In particolare, sul pascolo la scelta è ricaduta sui profili 8 ed 11, in relazione alle caratteristiche pedologiche evidenziate in sede di caratterizzazione e l'assenza di perturbazione derivante dalla presenza di vegetazione arborea limitrofa.

In accordo con questi criteri, i profili individuati come maggiormente rappresentativi per l'uso suolo erbaio sono stati il 13 ed il 15.

Le aree di campionamento sono state delimitate posizionando dei quadrati metallici sul terreno e successivamente si è proceduto alla separazione della fitomassa che ricadeva all'interno dell'area delimitata del quadrato da quella che si trovava all'esterno. È stata quindi misurata l'altezza massima raggiunta dalle piante e successivamente è stata effettuata l'asportazione di tutta la fitomassa presente.

Presso i laboratori del Dipartimento di Scienze Agronomiche e Genetica Vegetale Agraria sono state separate le specie presenti in ogni campione raccolto ed è stato effettuato il conteggio del numero di piante o culmi per specie. Infine, è stata calcolata la corrispondente densità per unità di superficie (ha). Dato che il modello EPIC non è in grado di simulare l'accestimento, per le graminacee è stato necessario prendere in considerazione il numero di culmi presenti per unità di superficie.

Per ogni campione è stata inoltre misurata, relativamente alle specie presenti, la superficie fogliare per il successivo calcolo del Leaf Area Index (LAI); tale dato è stato ottenuto attraverso un rilievo distruttivo e l'impiego di un planimetro.

La fitomassa presente in ogni campione, distinta per specie presenti è stata successivamente posta in stufa per la determinazione del peso della sostanza secca. I dati raccolti hanno consentito la stima dei dati produttivi dei sistemi colturali esaminati. La loro corretta determinazione ha grande rilevanza in considerazione del peso assunto da questa variabile nell'ambito del processo di calibrazione del modello di simulazione. La determinazione della sostanza secca relativa alla fitomassa è stata condotta secondo la metodica ufficiale, che prevede la sosta in stufa del campione vegetale ad una temperatura di 60°C fino al raggiungimento di un peso secco stabile nel tempo.

Ai fini della calibrazione del modello EPIC i dati utilizzati sono quelli relativi al

rilievo effettuato nella prima decade di aprile.

I valori produttivi ottenuti tramite il campionamento diretto in campo non tengono conto della biomassa asportata dagli animali durante il pascolamento. Dato che gli output del modello EPIC forniscono un valore di "resa per il foraggio" comprensiva sia della quantità raccolta meccanicamente che di quella ingerita dagli animali, è stato necessario stimare il quantitativo di fitomassa ingerita durante il pascolamento.

Tale stima è stata basata sul preciso monitoraggio del carico istantaneo degli animali al pascolo, delle categorie animali presenti, del peso medio degli animali, del loro livello produttivo e dell'entità delle eventuali integrazioni alimentari rispetto alla dieta basata sul pascolamento. Inoltre, sono stati considerati gli aspetti specifici legati alla comunità vegetale, quali la composizione floristica del pascolo e la pabularità delle specie presenti.

Per tale stima si è fatto ricorso a quanto riportato da Balasin (1990) secondo cui il livello di ingestione degli animali, espresso in kg di sostanza secca per 100 kg di peso vivo, varia in funzione della qualità del pascolo (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 - Livello di ingestione degli ovini in funzione della qualità del pascolo.

Qualità del pascolo	Livello di ingestione (kg s.s. / 100kg p.v.)
Pascoli di ottima qualità	5
Pascoli di media qualità	4 – 5
Pascoli di qualità scadente	2,5 – 4
Pascoli di qualità molto scadente	1,7 – 2,5

In base a tali valori è stata stimata prima l'ingestione oraria per capo (avente peso medio di 45 kg) pari a 0,375 kg di sostanza secca e successivamente, considerando una durata del pascolamento pari a 2 ore giornaliere per 15 giorni e il carico per ettaro (30 capi), è stato ottenuto il consumo totale pari a 337,5 kg ha⁻¹ di sostanza secca.

Con riferimento all'erbaio, attraverso i rilievi effettuati è stato poi possibile determinare la composizione floristica e la biomassa prodotta dalle specie presenti

in miscuglio. Partendo da tale ripartizione, è stato possibile stimare per ciascuna specie la fitomassa asportata con il pascolamento (Tabella 3.4).

Tabella 3.4 - Ripartizione percentuale delle specie presenti nell'erbaio e fitomassa asportata con il pascolamento.

Specie	Ripartizione percentuale	Fitomassa asportata con il pascolamento (t ha⁻¹)
Avena	43,70%	0,147
Loglio	41,80%	0,141
Trifoglio	14,40%	0,050

Successivamente, i quantitativi di biomassa totale asportata con il pascolamento sono stati sommati ai quantitativi biomassa residua stimati con le osservazioni dirette.

Anche nel caso del pascolo la quantità di fitomassa asportata dagli animali è stata stimata sulla base di quanto riportato in tabella 3.3. In base a tali valori è stata stimata un'asportazione di biomassa, espressa in sostanza secca, pari a circa 4,0 t ha⁻¹ per l'anno 2007 e di circa 5,0 t ha⁻¹ per l'anno 2008. Gli indici utilizzati per la stima della biomassa ingerita, pari a 2 e 2,8 rispettivamente per gli anni 2007 e 2008, sono stati individuati in base alla composizione floristica del pascolo nelle due annate. Grazie allo studio della composizione floristica è stato infatti possibile stimare la qualità del pascolo, considerando fattori quali ad esempio la pabularità delle specie presenti. La differente composizione floristica osservata nelle due annate può essere attribuita all'effetto dell'intero sistema colturale sulla presenza delle specie spontanee. Infatti nel 2007 il pascolo naturale è stato realizzato nel sito in cui nella prevalenza delle annate il terreno è lavorato e seminato per la coltivazione dell'erbaio. Tali operazioni vanno ad influire sulla presenza delle specie spontanee che si insediano al termine della coltivazione dell'erbaio. In tali condizioni si ha una netta prevalenza di specie spinose o caratterizzate da limitata

pabularità. Nel sito prevalentemente destinato al pascolo naturale ci troviamo in una situazione opposta: infatti le frequenti annate con destinazione a pascolo naturale (in media 4 anni consecutivi) garantiscono la costituzione o l'integrazione di una consistente banca del seme, che determina un rapido reinsediamento autunnale della cotica erbosa anche dopo l'annata in cui la superficie è sottoposta a lavorazione e semina dell'erbaio autunno-vernino.

3.1.5 Procedura seguita per la simulazione della dinamica del carbonio nel suolo

L'obiettivo della simulazione della dinamica del carbonio nel suolo è stato perseguito attraverso il raggiungimento dei seguenti risultati intermedi:

1. Calibrazione del modello;
2. Inizializzazione dei pool di carbonio;
3. Simulazione della dinamica del carbonio relativa a scenari climatici per il periodo 2010-2100.

3.1.5.1 Calibrazione del modello

Il primo passo è stato quello di giungere alla corretta calibrazione delle colture presenti nei diversi sistemi colturali così da poter simulare correttamente le produzioni stimate tramite i campionamenti. Questo primo obiettivo è di fondamentale importanza in quanto, come riportato in diverse pubblicazioni (R.C. Izaurralde, 2006; R.C. Izaurralde, 2007), l'input di carbonio verso il suolo da parte delle piante è un fattore fondamentale che va a condizionare la dinamica del carbonio stesso nel terreno e, di conseguenza, la corretta simulazione delle produzioni è fondamentale per una corretta quantificazione del carbonio che viene apportato al terreno.

3.1.5.1.1 Inserimento delle informazioni pedologiche

Nella finestra di WinEPIC utilizzata per la realizzazione dei nuovi suoli sono stati inseriti i dati riguardanti la tessitura del terreno individuata in base ai risultati delle analisi fisiche e basandosi sulla classificazione USDA. In base a questa classificazione, il suolo dei diversi profili è stato identificato come "sandy loam". È stato inoltre specificato il gruppo idrologico di appartenenza, il quale è correlato

alla velocità di infiltrazione dell'acqua nel terreno e viene utilizzato dal modello per la simulazione del ruscellamento superficiale. Tutti i campioni riferiti ai profili scavati nel pascolo e nell'erbaio sono stati associati al gruppo idrologico B in accordo con i risultati forniti dal modello SPAW (Saxton e Willey, 2006) utilizzato per la generazione delle caratteristiche idrologiche del terreno. I terreni appartenenti a questo gruppo idrologico sono caratterizzati da un limitato potenziale di ruscellamento quando il loro contenuto idrico supera la capacità di campo e l'acqua nel muoversi all'interno del suolo non incontra alcun impedimento. Altre caratteristiche peculiari dei suoli appartenenti al gruppo idrologico B sono un contenuto di argilla compreso tra il 10 ed il 20%, il 50-90% di sabbia e una tessitura di tipo "loamy sand" o "sandy loam". Inoltre i suoli che rientrano in questa categoria sono contraddistinti da un valore di conducibilità idrica a saturazione compreso tra i 10 e 40 $\mu\text{m sec}^{-1}$ ($36 \div 144 \text{ mm h}^{-1}$) (NEH, Part 630 Hydrology, 2007).

Altro parametro inserito al momento della generazione del nuovo suolo è il valore di albedo del terreno. L'albedo è la quota di radiazione globale che viene riflessa e rinviata verso l'atmosfera; questa caratteristica è influenzata dal colore del terreno, infatti colori scuri aumentano la quota di energia che viene trattenuta mentre i colori più chiari riducono l'assorbimento di energia termica (Bonciarelli, 1995). Al terreno oggetto di studio è stato attribuito un valore di albedo pari a 0,28 in accordo con la classificazione di Ceccon e Borin (1995).

Una volta inserite queste prime voci riferite a caratteristiche generali del suolo sono stati immessi i valori richiesti dal modello e riferiti per ogni profilo ad ogni singolo orizzonte.

Tali valori sono stati, in buona parte, determinati grazie alle analisi fisico-chimiche condotte ma alcuni di questi (punto di appassimento, capacità di campo e la conducibilità idrica del terreno a saturazione) sono stati stimati attraverso l'utilizzo del modello per le caratteristiche idrologiche del terreno SPAW. Tale modello è in grado di stimare le caratteristiche idrologiche di un suolo in base ai caratteri fisici del terreno come: tessitura, contenuto di sostanza organica, quantità di scheletro e grado di compattazione.

I dati inseriti nel database del modello al momento della creazione del nuovo

suolo sono stati:

- ◆ spessore dell'orizzonte (m);
- ◆ densità apparente dell'orizzonte (t/m^3);
- ◆ punto di appassimento (m/m);
- ◆ capacità di campo (m/m);
- ◆ contenuto di sabbia (%);
- ◆ contenuto di limo (%);
- ◆ azoto organico (ppm);
- ◆ pH;
- ◆ somma delle basi (cmol/kg);
- ◆ sostanza organica (%);
- ◆ carbonato di calcio (%);
- ◆ capacità di scambio cationico (cmol/kg);
- ◆ scheletro (%);
- ◆ concentrazioni di nitrati;
- ◆ contenuto di fosforo (ppm);
- ◆ residui colturali (t/ha);
- ◆ densità apparente determinata dopo essiccazione in stufa;
- ◆ conducibilità idrica a saturazione (mm/h).

Per alcune variabili secondarie (es. le voci relative all'elemento fosforo nel terreno) il valore assunto non è stato determinato in modo analitico ma è stato generato direttamente dal modello di simulazione sulla base di molteplici dati in input disponibili.

3.1.5.1.2 Inserimento delle informazioni agronomiche

Per la simulazione è stata ricreato l'insieme delle tecniche agronomiche adottate per la gestione dei due differenti sistemi di coltivazione a confronto, modificando successivamente alcuni parametri presenti nel database in base ai valori direttamente rilevati in campo.

I due sistemi colturali sono stati creati attraverso la finestra "*Management*" presente nella finestra "*Data/Setup*" e scegliendo di inserire un nuovo sistema

colturale formato da 1 a massimo 4 colture annuali. È stata indicata la modalità di lavorazione (convenzionale, ridotta o non-lavorazione), di irrigazione e le colture presenti.

Si ottiene in questo modo un sistema colturale che si può definire "generico" e che dovrà essere modificato in base alle reali operazioni colturali effettuate.

Per i due sistemi colturali sono state inserite informazioni riguardanti:

1. la lavorazione del terreno;
2. la semina;
3. il numero di piante/culmi presenti per unità di superficie;
4. la concimazione;
5. la gestione del pascolamento;
6. la raccolta (limitatamente all'erbaio).

Inoltre per il corretto funzionamento del modello è stata inserita l'operazione denominata "*kill*" necessaria a far sì che il modello arresti in modo definitivo lo sviluppo della coltura.

Per arrivare alla calibrazione del modello è stata necessaria anche la modifica dei seguenti parametri relativi alle colture:

- altezza massima raggiunta dalla pianta;
- massimo valore misurato del "Leaf Area Index";
- quantitativo di seme impiegato.

3.1.5.1.3 La finestra "Parm Editor"

Nel "*Parm Editor*" sono presenti numerosi parametri che influenzano indipendentemente dal sistema colturale, dalla stazione meteo adottata e dal tipo di suolo, tutte le simulazioni effettuate. I valori assunti da alcuni dei parametri presenti sono stati modificati allo scopo di calibrare EPIC sui sistemi colturali considerati e per il sito di riferimento.

Si riporta l'elenco dei parametri presenti nel "*Parm Editor*" specificando quali di questi sono stati modificati ed il valore inserito.

N°	Nome (intervallo)	Descrizione	Valore	
1	CROP CANOPY-PET (1_2)	Utilizzato nell'equazione di Penman-Monteith per considerare la resistenza aerodinamica della coltura.	1	Mod. ¹
2	ROOT GROWTH-SOIL STRENGTH (1_2)	Utilizzato per valutare lo stress radicale causato dalla tenacità del terreno (valori bassi = maggiore stress).	2	Default
3	ROOT GROWTH-SOIL STRENGTH (1_2)	Frazione della stagione di crescita in cui lo stress idrico riduce l'H.I.	0.5	Default
4	DENITRIFICATION RATE CONSTANT (1_2)	Controlla la velocità di denitrificazione.	0.05	Mod. ¹
5	SOIL WATER LOWER LIMIT (0_1)	Limite inferiore del contenuto idrico nei primi 50 cm del terreno espresso come frazione del contenuto idrico al punto di appassimento.	0.5	Default
6	WINTER DORMANCY (0_1)	Simula la dormienza nelle specie con accrescimento nel periodo invernale bloccando lo sviluppo quando il numero di ore di luce è inferiore al numero di ore di luce del giorno più breve più il valore del Parm6.	0	Mod. ²
7	N FIXATION (0_1)	Regola il fenomeno della fissazione dell'azoto.	0.5	Default
8	SOLUBLE P RUNOFF COEF(.1*M^3/T)(10_20)	Concentrazione di fosforo nei sedimenti.	10	Default
9	PEST DAMAGE MOISTURE THRESHOLD (25_150)	Piovosità meno il valore del runoff.	50	Default
10	PEST DAMAGE COVER THRESHOLD (1_10)	Residui colturali più biomassa epigea.	50	Default
11	MOISTURE REQUIRED FOR SEED GERMINATION (0.3_0.9)	Regola l'umidità del terreno necessaria per la germinazione.	-10	Default (disattivato)
12	SOIL EVAPORATION COEF (1.5_2.5)	Regola l'evaporazione dal terreno.	1.5	Default
13	HARGREAVES PET EQ EXP (0.5_0.6)	Valore per la stima dell'evapotraspirazione potenziale con la formula di Hargreaves.	0.6	Default
14	NITRATE LEACHING RATIO (0.1_1)	Regola la lisciviazione dell'azoto.	0.5	Default
15	GROUND WATER STORAGE LOSS RATE (1_10)		5	Default
16	PLOW LAYER DEPTH (.05_.15)	Influenza la dinamica del fosforo in funzione delle lavorazioni.	0.15	Default
17	CRACK FLOW COEF (0_1)	Infiltrazione dell'acqua dovuta alla crepacciatura del terreno.	0	Mod. ³
18	PESTICIDE LEACHING RATIO (0.1_1)	Regola la lisciviazione dei fitofarmaci distribuiti.	0.1	Default
19	FRACTION OF MATURITY AT SPRING GROWTH INITIATION	Azzerà l'indice delle unità termiche quando la coltura supera il mese più freddo.	0	Default

	(0_1)			
20	MICROBIAL DECAY RATE COEF (0.5_1.5)	Influenza le equazioni di acqua, temperatura e ossigeno del terreno.	1	Default
21	KOC FOR CARBON LOSS IN WATER AND SEDIMENT (500._1500.)	$KD = KOC *$	1000	Default
22	K POOL FLOW COEF (0.00001_0.0005)	Regola i flussi tra i pool del potassio.	0.0001	Default
23	EXPONENTIAL COEF IN RUSLE C FACTOR EQ (0.5_1.5)	Usato per stimare gli effetti dei residui coltrali sull'erosione.	0.3	Default
24	MAXIMUM DEPTH FOR BIOLOGICAL MIXING (0.1_0.3)	Espressa in metri, influenzata dalla profondità di lavorazione.	0.25	Mod. ⁴
25	BIOLOGICAL MIXING EFFICIENCY (0.1_0.5)	Simula il rimescolamento dei primi strati del terreno dovuto all'azione di animali terricoli.	0.25	Default
26	EXPONENTIAL COEF IN RUSLE C FACTOR EQ (0.05_0.2)	Simula l'effetto dello sviluppo delle colture sull'erosione.	0.01	Default
27	LOWER LIMIT NITRATE CONC(0_10.)	Usato per la concimazione automatica, mantiene il contenuto di N nel terreno al di sopra del valore impostato.	0	Default
28	ACCEPTABLE PLANT N STRESS LEVEL (0_1)	Stress causato dalla carenza di azoto sopportabile dalla coltura. Usato per la concimazione automatica.	1.25	Default
29	K POOL FLOW COEF (0.001_0.02)	Regola i flussi tra i pool del potassio.	0.01	Default
30	DENITRIFICATION SOIL-WATER THRESHOLD (.9_1.1)	Contenuto idrico del terreno oltre il quale simulare la denitrificazione.	1.05	Mod. ¹
31	FURROW IRRIGATION SEDIMENT ROUTING EXPONENT (1_1.5)	Coeff. per tener conto della velocità di scorrimento dell'acqua nei canali per la simulazione della deposizione di sedimenti.	1.5	Default
32	MINIMUM C FACTOR VALUE IN EPIC SOIL EROSION EQ (0.0001_0.8)		0.05	Default
33	PUDDLING SATURATED CONDUCTIVITY (0.00001_0.1)	Utilizzato per la simulazione dell'irrigazione per sommersione. Regola la velocità di infiltrazione (mm/h).	1	Default
34	SOLUBLE P RUNOFF EXPONENT MODIFIED GLEAMS METHOD (1_1.5)	Regola la simulazione della perdita di fosforo a causa del ruscellamento.	1	Default
35	WATER STRESS WEIGHTING COEF (0_1)	Regola la simulazione dello stress idrico subito dalle colture.	1	Default
36	FURROW IRRIGATION BASE SEDIMENT CONC (0.01_0.2)	Regola la sedimentazione in funzione della velocità di scorrimento delle acque.	0.2	Default
37	PEST KILL SCALING FACTOR (100_10000)	Regola l'efficacia dei trattamenti con fitofarmaci.	100	Default
38	HARGREAVES PET EQ	Coeff. per la stima	0.0032	Default

	COEF (0.0023_0.0032)	dell'evapotraspirazione potenziale con la formula di Hargreaves.		
39	AUTO N FERT SCALING FACTOR (50_500)	Regola il momento di inizio di utilizzo dell'azoto da parte della coltura.	300	Default
40	CROP GROWTH CLIMATIC FACTOR ADJUSTMENT (40_100.)	Rapporto tra la temperatura media della stagione di crescita e la piovosità media nello stesso periodo.	0	Default
41	OIL EVAPORATION-COVER COEF (0.01_0.2)	Regola l'evaporazione dal terreno in funzione della presenza o meno di residui colturali.	0	Default
42	SCS CURVE NUMBER INDEX COEF (.5_1.5)		1	Default
43	UPWARD MOVEMENT OF SOLUBLE P BY EVAPORATION COEF (1_20.)		4	Default
44	RATIO OF SOLUBLE C CONCENTRATION IN RUNOFF TO PERCOLATE (0.1_1.)		0.5	Default
45	COEF IN CENTURY EQ ALLOCATING SLOW TO PASSIVE HUMUS (0.001_0.05)	Regola la dinamica del carbonio nel suolo tra i diversi pool.	0.05	Default
46	AUTO FERTILIZER WEIGHTING FACTOR (0.0_1.0)	Parametro per i criteri da seguire per la distribuzione automatica dei fertilizzanti.	0.5	Default
47	CENTURY SLOW HUMUS TRANSFORMATION RATE D^-1 (0.00041_0.00068)	Regola la dinamica del carbonio nel suolo.	0.000548	Default
48	CENTURY PASSIVE HUMUS TRANSFORMATION RATE D^-1 (0.0000082_0.000015)	Regola la dinamica del carbonio nel suolo.	0.000012	Default
49	FRACTION OF ABOVE GROUND PLANT MATERIAL BURNED (0_1.)	Parte dei residui colturali eventualmente bruciati.	0	Mod. ⁵
50	TECHNOLOGY COEF (0.0_0.01)		0	Default
51	COEF ADJUSTS MICROBIAL ACTIVITY FUNCTION IN TOP SOIL LAYER (0.1_1.)		1	Default
52	EXPONENTIAL COEF IN EQ EXPRESSING TILLAGE EFFECT ON RESIDUE DECAY RATE (5_15.)		20	Mod. ¹
53	COEF IN OXYGEN EQ USED IN MODIFYING		0.9	Default

	MICROBIAL ACTIVITY WITH SOIL DEPTH (0.8_0.95)			
54	EXPONENTIAL COEF IN POTENTIAL WATER USE ROOT GROWTH DISTRIBUTION EQ (2.5_7.5)		5	Default
55	COEF USED IN ALLOCATING ROOT GROWTH BETWEEN TWO FUNCTIONS (0.0_1.0)	Regola lo sviluppo dell'apparato radicale.	0.5	Default
56	EXPONENTIAL COEF IN ROOT GROWTH DISTRIBUTION BY DEPTH FUNCTION (5._10.)		10	Default
57	N VOLATILIZATION COEF (0.05_0.5)	Regola la volatilizzazione dell'azoto.	0.1	Default
58	RUNOFF AMOUNT TO DELAY PEST APPLICATION (0.0_25.0)	Non esegue la distribuzione dei fitofarmaci quando la pioggia supera il valore impostato.	0	Default
59	SOIL WATER VALUE TO DELAY TILLAGE (0.0_1.0)	Sposta le lavorazioni in funzione della pioggia per simulare la lavorabilità del terreno (per lavorazioni automatiche).	10	Default (disattivato)
60	EXPONENTIAL COEF IN EPIC SOIL EROSION C FACTOR EQ (0.5_2.)	Influisce sull'equazione per la simulazione dell'erosione del terreno.	2	Default
61	WEIGHTING FACTOR FOR ESTIMATING SOIL EVAPORATION (0_1.)	Regola la perdita di acqua dal terreno in funzione dell'evaporazione e della risalita capillare dagli orizzonti più profondi ai più superficiali.	1	Mod. ⁶
62	EXPONENTIAL COEF REGULATES UPWARD N MOVEMENT BY EVAP (0.2_2.)	Regola la risalita dell'azoto nel terreno.	0.5	Default
63	UPPER LIMIT OF N CONC IN PERCOLATIOG WATER (100._10000.)	Espresso in ppm.	9000	Default
64	UPPER LIMIT OF NITRIFICATION-VOLATILIZATION AS A FRACTION OF NH3 PRESENT (0._1.)		0.1	Default
65	REDUCES NRCS RUNOFF CN RETENTION PARM FOR FROZEN SOIL. FRACTION OF S FROZEN SOIL (0.05_0.5)		0.25	Default
66	CONVERTS STANDING		0.01	Default

	DEAD RESIDUE TO FLAT RESIDUE. DAILY FALL RATE AS A FRACTION IF STL (0.0001_0.05)			
67	WIND EROSION THRESHOLD WIND SPEED (4.0_10.0)	Velocità del vento al di sotto della quale non viene simulata l'erosione.	6	Default
68	N FIXATION UPPER LIMIT (1.0_30.0)	Espresso in kg/ha/giorno.	20	Default
69	RESETS HEAT UNITS AFTER HARVEST (0.0_1.0)		0.99	Default
70	CHANGE IN DAY LENGTH POWER IN LAI DEVELOPMENT EQ (1.0_10.0)	Regola lo sviluppo del LAI in funzione della lunghezza del giorno.	3	Default

- 1) Il valore impostato è stato suggerito dai ricercatori del Blackland Research Center in occasione della loro attività svolta presso l'Università degli Studi di Sassari nell'ambito del progetto "Visiting Professor".
- 2) Date le specie presenti, le quali non presentano una dormienza invernale determinata dal fotoperiodo, è stato impostato il valore 0.
- 3) Dato che nel terreno considerato il fenomeno del crepacciamento è assente è stato impostato il valore 0 in accordo con quanto suggerito dai ricercatori del Blackland Research Center.
- 4) Valore derivante dalla massima profondità raggiunta dalle lavorazioni.
- 5) Dato che nei siti presi in esame i residui colturali non vengono bruciati è stato impostato il valore 0.
- 6) Viste le caratteristiche del terreno e in accordo con quanto consigliato dai ricercatori del Blackland Research Center è stato impostato il valore 0.

3.1.5.1.4 La finestra "Control Table"

Permette di impostare i criteri che guidano la simulazione. Come precedentemente evidenziato, è possibile creare differenti "Control Table" da utilizzare alternativamente in funzione della simulazione che si desidera effettuare.

Per le simulazioni necessarie allo studio della dinamica della sostanza organica è stato creato un differente "Control Table" per ciascuno dei due differenti sistemi colturali, nei quali sono stati modificati i seguenti valori di default:

- ◆ la durata della simulazione espressa in anni;

- ◆ l'anno di inizio della simulazione;
- ◆ l'equazione utilizzata dal modello per la stima dell'evapotraspirazione durante la simulazione. In questo caso è stata selezionata l'equazione di Penman-Monteith in quanto fra le altre proposte è l'unica che, tenendo conto della concentrazione della CO₂ nell'atmosfera, può essere utilizzata efficacemente nelle simulazioni per lo studio degli effetti dei mutamenti climatici;
- ◆ il numero di animali presenti per unità di superficie;
- ◆ il tempo che gli animali non trascorrono al pascolo;
- ◆ la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera all'inizio della simulazione.

3.1.5.1.5 Analisi statistica

L'analisi statistica è stata condotta mediante l'utilizzo del software IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates) sviluppato dall'ISCI (Fila *et al.*, 2003). Tale programma è di fatto un insieme di strumenti creati per facilitare l'analisi dei risultati forniti dai modelli di simulazione. È posta particolare attenzione nelle tecniche statistiche che possono essere utilizzate per comparare tra loro i valori osservati e quelli stimati dal modello di simulazione. Grazie a tale software è possibile utilizzare, rapidamente e con facilità, diversi indici e test statistici.

La valutazione delle performance del modello si basa sulla differenza tra i valori osservati (O) e quelli simulati (S) o sulla correlazione-regressione dei valori simulati *vs* osservati o viceversa.

In questo caso i dati sono stati valutati sia tramite l'analisi delle differenze con dati appaiati (one to one) che tramite l'analisi della correlazione dei dati.

Per l'analisi dei risultati tramite le statistiche basate sulle differenze si fa ricorso a tre classi di indici:

- differenze quadratiche;
- differenze semplici;
- differenze assolute.

Alle differenze quadratiche appartengono i seguenti indici:

Simulation bias (Kobayashi e Salam, 2000): SB; $SB = (\bar{S} - \bar{O})^2$

Root mean squared variation (Kobayashi e Salam, 2000): RMSV;

$$RMSV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(S_i - \bar{S}) - (O_i - \bar{O})]^2}{n}}$$

Root mean squared error (Fox, 1981): RMSE;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

General standard deviation (Jørgensen et al., 1986): GSD;

$$GSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \times \frac{100}{\bar{O}}} = RMSE \times \frac{100}{\bar{M}}$$

Normalized mean squared error (Kumar, 2000): NMSE;

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n S_i \times O_i}$$

Model efficiency (Greenwood et al., 1985): EF;

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Index of agreement (Willmott and Wicks, 1980): d;

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Coefficient of determination (Loague and Green, 1991): CD;

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{o})^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

Queste statistiche generalmente sono molto sensibili a valori estremi, specialmente nel caso in cui si abbiano dei dataset non molto numerosi. Il limite inferiore per gli indici SB, RMSV, RMSE GSD e NMSE corrisponde a 0 (zero) ed indica la perfetta aderenza tra i dati osservati e quelli simulati. SB è un indice della distanza esistente tra i valori simulati e quelli osservati mentre RMSV indica di quanto il modello sbaglia nel simulare la variabilità dei dati attorno alla media. L'indice EF può avere sia valori positivi che negativi, il valore massimo è 1 mentre il valore minimo è, in linea teorica, $-\infty$. Valori di EF negativi indicano una cattiva stima da parte del modello. L'indice CD fornisce una stima della porzione della varianza totale dei valori misurati che viene spiegata dai valori simulati e ha valore ottimale pari a 1 quando la deviazione dalla media dei valori osservati è la stessa per valori osservati e simulati.

Sono invece indici di differenze semplici:

Mean bias error (Addiscott and Whitmore, 1987): MBE;

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{S_i - O_i}{n}$$

Relative error (Addiscott and Whitmore, 1987): E;

$$E = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{S_i - O_i}{O_i}$$

Maximum error: MaxE;

$$MaxE = \text{Max}(S_i - O_i)$$

Coefficient of residual mass (Loague and Green, 1991): CRM;

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

Fraction Bias (Kumar, 2000): FB;

$$FB = 2 \times \frac{\bar{S} - \bar{O}}{\bar{S} + \bar{O}}$$

Gli indici MBE, E, MaxE, CRM e FB possono assumere valori sia positivi che negativi con valore ottimale prossimo allo zero. L'indice FB ha valore che varia tra +2 e -2. Per tutti gli indici, fatta eccezione per CRM, valori positivi indicano che il modello sovrastima rispetto ai valori misurati e viceversa nel caso in cui tali indici assumano valori negativi.

Indici di differenze assolute sono invece:

Maximum absolute error (Loague and Green, 1991): ME;

$$ME = \text{MaxE} |S_i - O_i|$$

Mean absolute error (Schaeffer, 1980): MAE;

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|S_i - O_i|}{n}$$

General absolute standard deviation (Jørgensen et al., 1986): GASD;

$$GASD = 100 \times \sum_{i=1}^n \frac{|S_i - O_i|}{n} \times \frac{100}{|\bar{O}|} = MAE \times \frac{100}{|\bar{O}|}$$

Modified modeling efficiency (Yang et al., 2000): EF₁;

$$EF_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}$$

In base a tali indici la simulazione effettuata dal modello è accurata tanto più MA, MAE, GASD tendono al loro valore minore ovvero zero e EF₁ tende a uno.

In aggiunta a tali indici il software IRENE è in grado di fornire delle statistiche relative alla correlazione esistente tra i valori osservati (O) e quelli derivanti dalla simulazione (S). Fra questi è stato utilizzato il coefficiente di correlazione "r" e i valori dell'intercetta (a) e della pendenza (b) dalla retta di regressione ottenuta dal confronto tra i dati misurati su quelli osservati. Quest'ultimo metodo è stato suggerito anche dai ricercatori del Blackland Research and Extension Center di Temple (TX) durante lo svolgimento di un corso specifico per l'utilizzo del modello di simulazione EPIC.

3.1.5.2 Inizializzazione dei pool di carbonio

La metodica normalmente utilizzata per l'inizializzazione dei pool di carbonio organico del suolo prevede l'esecuzione di una simulazione per un periodo minimo di 15 anni antecedenti l'anno di avvio della simulazione per lo studio della dinamica del carbonio nel suolo. Durante tale prima simulazione i modelli ripartiscono il carbonio totale presente nel terreno tra i diversi pool caratterizzati da una differente velocità di turnover. Terminata tale simulazione gli output inerenti il contenuto di carbonio nel suolo, e riferiti ai singoli pool, devono essere utilizzati come valori in input per l'avvio della simulazione utilizzata per lo studio della dinamica del carbonio nel terreno.

Per il presente caso di studio si è utilizzata una tecnica differente come suggerito anche da alcuni ricercatori del Blackland Research and Extension Center (BREC) durante la loro permanenza presso il Dipartimento di Scienze Agronomiche e Genetica Vegetale Agraria dell'Università degli Studi di Sassari.

Tale metodologia sfrutta una peculiarità del modello EPIC ovvero la possibilità di effettuare una pre-simulazione (chiamata pre-run) che precede la simulazione vera e propria. Una volta completata la calibrazione delle colture, è stata quindi effettuata una pre-simulazione avente una durata di 30 anni durante la quale il modello EPIC ripartisce autonomamente il carbonio organico totale presente nel terreno tra i diversi pool di sostanza organica. Al termine di tale pre-simulazione alcuni degli output generati dal modello, tra i quali quelli inerenti la dinamica del carbonio nel terreno e contenenti la ripartizione del carbonio organico nei differenti pool, vengono automaticamente utilizzati dal modello come dati in input per la vera e propria simulazione che quindi prenderà avvio con il contenuto di carbonio nel suolo già ripartito tra i 3 pool relativi alla sostanza organica.

È stato possibile utilizzare tale semplificazione alla metodica normalmente seguita per via della stabilità negli anni nella gestione dei sistemi colturali dato che i sistemi presi in esame vengono gestiti utilizzando sempre le stesse tecniche colturali da circa 30 anni.

3.1.5.3 Simulazione della dinamica del carbonio in relazione alla differente gestione agricola e a differenti scenari climatici per il periodo 2010-2099

Le simulazioni per lo studio della dinamica del carbonio hanno interessato un ampio arco di tempo e hanno permesso di osservare la dinamica dei tre pool principali della sostanza organica nei differenti usi del suolo presi in esame e paragonare tali dinamiche in modo tale da evidenziare come nel corso degli anni la differente gestione agricola influenzi la dinamica del contenuto di carbonio del terreno.

Sono state inoltre condotte delle simulazioni utilizzando come dati meteorologici in input quelli generati da 2 modelli di circolazione generale (General Circulation Model, GCM) sulla base di due scenari di emissione dei gas serra proposti dall'IPCC. È stato possibile condurre tale attività all'interno del progetto SOILSINK grazie alla collaborazione con il Centro di Ricerca per lo Studio delle Relazioni tra Pianta e Suolo del Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura (CRA-RPS) di Roma che ha messo a disposizione gli scenari climatici futuri appositamente generati presso il Goddard Institute of Space Studies della NASA.

Tali scenari sono stati realizzati utilizzando due differenti modelli di circolazione globale: il modello GISS dello stesso Goddard Institute of Space Studies (Hansen et al., 2000; 2002) e l'HadCM3 (Gordon et al., 2000) sviluppato dall'Hadley Centre (UK) e basandosi sugli scenari di emissione dei gas serra A2 e B2 proposti dall'IPCC. Lo scenario A2 ipotizza un futuro estremamente eterogeneo con un forte sviluppo della popolazione, un lento sviluppo dell'economia e lento sviluppo tecnologico. Lo scenario B2 invece ipotizza una crescita economica ed un incremento demografico intermedi e una maggiore attenzione verso soluzioni su scala locale per la sostenibilità economica, sociale ed ambientale (IPCC, 2007).

Partendo dalla serie storica relativa alla stazione meteorologica di Monti, gli scenari sono stati realizzati sulla base del periodo 1985 – 2006 (baseline) attraverso la modifica dei valori giornalieri di radiazione netta, temperatura massima e minima e piovosità originali del periodo, secondo quanto indicato dagli output forniti dai modelli di circolazione generale.

Per i due GCM utilizzati e per entrambi gli scenari di emissione considerati sono

stati quindi ottenuti dei data set, riferiti al periodo 2010-2099 anni, che descrivono il mutamento climatico previsto. Tali data set fanno riferimento a 3 sub-periodi: anni 2020 (± 10 anni), anni 2050 (± 10 anni) e anni 2080 (± 10 anni) in ognuno dei quali viene simulato il crescente effetto nel tempo del mutamento climatico. Utilizzando tali data set sono state create 4 serie storiche "future" (tabella 3.5) utilizzate come dati in input per il modello nelle simulazioni effettuate per studiare l'influenza del mutamento climatico sulle produzioni e sulla dinamica del carbonio nel terreno.

Tabella 3.5 - Tabella riassuntiva delle serie storiche future generate.

GCM	Scenario	Anni
GISS	A2	1976 - 2099
	B2	1976 - 2099
HadCM3	A2	1976 - 2099
	B2	1976 - 2099

Per la generazione delle serie storiche future è stato assegnato un numero progressivo (1 - 22) agli anni che costituiscono la baseline e sui quali sono state create le proiezioni climatiche future (tabella 3.6). Successivamente è stato assegnato in modo casuale un numero compreso tra 1 e 22 agli anni che formano ciascun sub-periodo in modo tale da assegnare ad ogni anno il corrispondente anno derivante dalla baseline (tabella 3.7).

Tabella 3.6 - Numero di identificazione progressivo per gli anni di riferimento utilizzati per la creazione delle serie storiche future.

Anno di riferimento	Numero identificativo	Anno di riferimento	Numero identificativo
1985	1	1996	12
1986	2	1997	13
1987	3	1998	14
1988	4	1999	15
1989	5	2000	16
1990	6	2001	17
1991	7	2002	18
1992	8	2003	19
1993	9	2004	20
1994	10	2005	21
1995	11	2006	22

Tabella 3.7 - Corrispondenze tra gli anni di riferimento e gli anni delle serie storiche future.

Anni '20	ID casuale	Anno corrispondente	Anni '50	ID casuale	Anno corrispondente	Anni '80	ID casuale	Anno corrispondente
2010	6	1990	2040	6	1990	2070	6	1990
2011	19	2003	2041	19	2003	2071	19	2003
2012	17	2001	2042	17	2001	2072	17	2001
2013	19	2003	2043	19	2003	2073	19	2003
2014	15	1999	2044	15	1999	2074	15	1999
2015	13	1997	2045	13	1997	2075	13	1997
2016	5	1989	2046	5	1989	2076	5	1989
2017	8	1992	2047	8	1992	2077	8	1992
2018	18	2002	2048	18	2002	2078	18	2002
2019	11	1995	2049	11	1995	2079	11	1995
2020	14	1998	2050	14	1998	2080	14	1998
2021	22	2006	2051	22	2006	2081	22	2006
2022	7	1991	2052	7	1991	2082	7	1991
2023	19	2003	2053	19	2003	2083	19	2003
2024	7	1991	2054	7	1991	2084	7	1991
2025	9	1993	2055	9	1993	2085	9	1993
2026	8	1992	2056	8	1992	2086	8	1992
2027	1	1985	2057	1	1985	2087	1	1985
2028	21	2005	2058	21	2005	2088	21	2005
2029	4	1988	2059	4	1988	2089	4	1988
2030	4	1988	2060	4	1988	2090	4	1988
2031	7	1991	2061	7	1991	2091	7	1991
2032	1	1985	2062	1	1985	2092	1	1985
2033	21	2005	2063	21	2005	2093	21	2005
2034	12	1996	2064	12	1996	2094	12	1996
2035	18	2002	2065	18	2002	2095	18	2002
2036	17	2001	2066	17	2001	2096	17	2001
2037	8	1992	2067	8	1992	2097	8	1992

Di seguito (tabella 3.8 e figure 3.12, 3.13, 3.14) si riporta il confronto effettuato tra i valori medi annuali per la temperatura massima e minima (°C) e per la piovosità totale (mm) degli anni di riferimento (baseline) e gli scenari futuri creati per i 3 sub-periodi riferiti ai prossimi 90 anni.

Tabella 3.8 - Differenze osservate per i valori di temperatura massima e minima media annuale e le precipitazioni annuali tra agli anni di riferimento e gli scenari climatici futuri generati.

GCM	Scenario	Periodo di riferimento	Temp. massima media (°C)	Temp. minima media (°C)	Precipitazioni (mm)
GISS	A2	2020	+ 0,42	+ 0,47	- 43,5
		2050	+ 1,33	+ 1,38	- 78,5
		2080	+ 2,97	+ 3,02	- 121,74
	B2	2020	+ 0,46	+ 0,5	- 42,95
		2050	+ 0,87	+ 0,92	- 59,76
		2080	+ 1,9	+ 1,94	- 101,6
HadCM3	A2	2020	+ 0,62	+ 0,67	- 4,89
		2050	+ 1,81	+ 1,85	- 45
		2080	+ 3,44	+ 3,48	- 155,44
	B2	2020	+ 0,64	+ 0,68	- 13,76
		2050	+ 1,3	+ 1,34	- 60,85
		2080	+ 2,15	+ 2,2	- 51,71

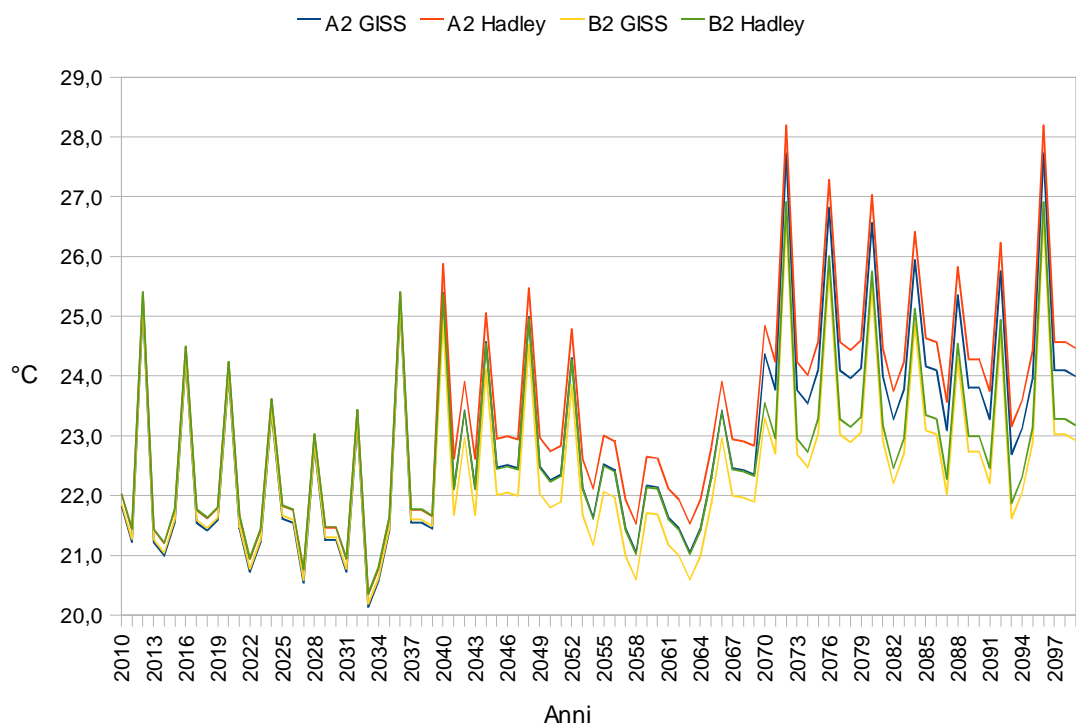


Figura 3.12 - Confronto dell'andamento della temperatura massima media annuale tra le 4 serie storiche future create.

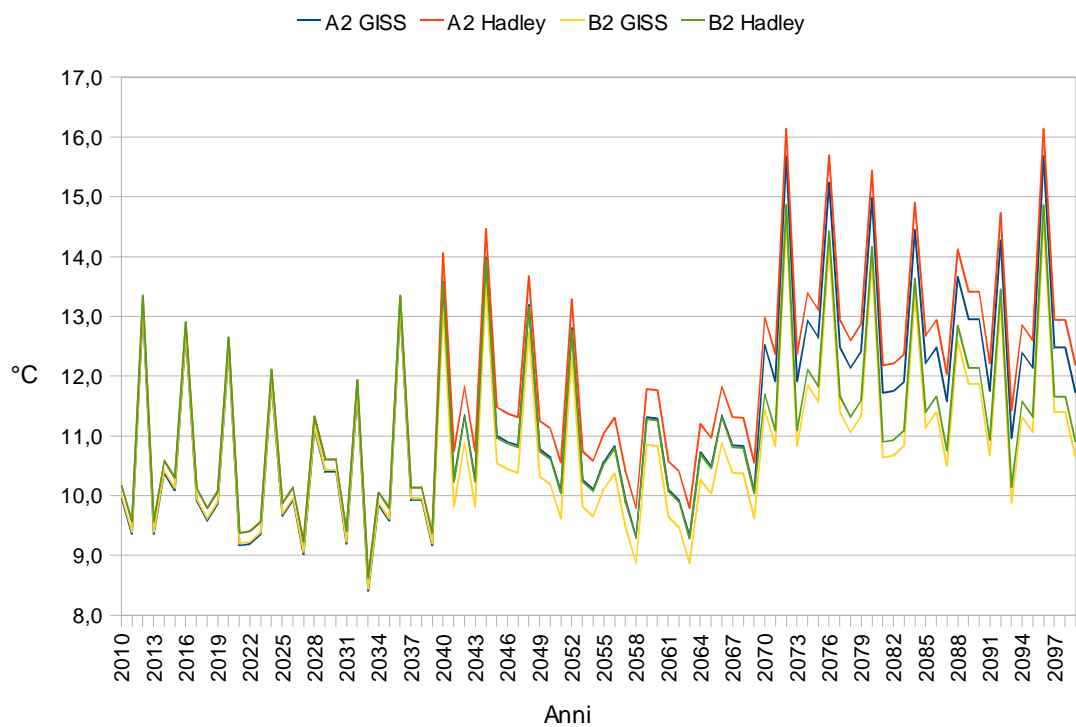


Figura 3.13 - Confronto dell'andamento della temperatura minima media annuale tra le 4 serie storiche future create.

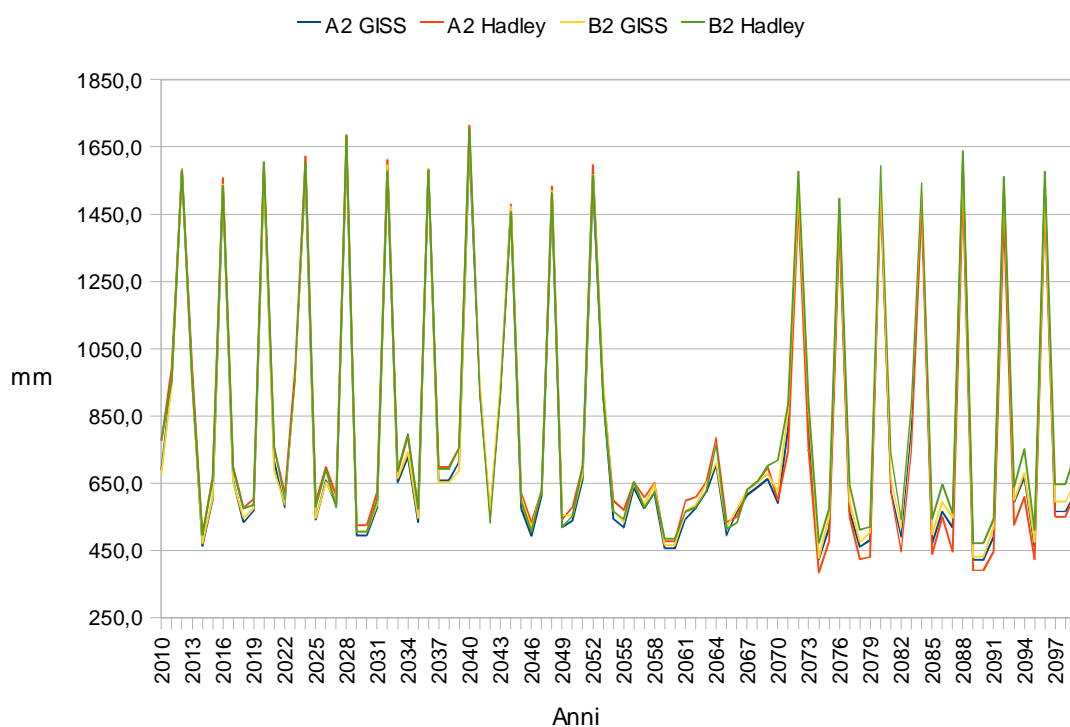


Figura 3.14 - Confronto dell'andamento della piovosità totale annuale tra le 4 serie storiche future create.

Come è possibile osservare il modello di circolazione generale HadCM3 simula un più marcato aumento delle temperature rispetto al modello GISS, mentre tra gli scenari di emissione, lo scenario A2 determina il maggiore aumento delle temperature. Per quanto riguarda la piovosità, il maggior decremento è stimato dal modello di circolazione generale HadCM3 basato sullo scenario A2. Lo stesso modello, utilizzando lo scenario B2 prevede le minori riduzioni della piovosità.

Le simulazioni basate sull'utilizzo degli scenari che simulano il mutamento climatico sono state condotte con il valore relativo alla concentrazione atmosferica della CO₂ variabile nel tempo (figura 3.15). In particolare si aveva una concentrazione iniziale pari a 386 ppm relativamente all'anno 2010 ed è stata raggiunta, nell'anno 2099, una concentrazione pari a 608 ppm.

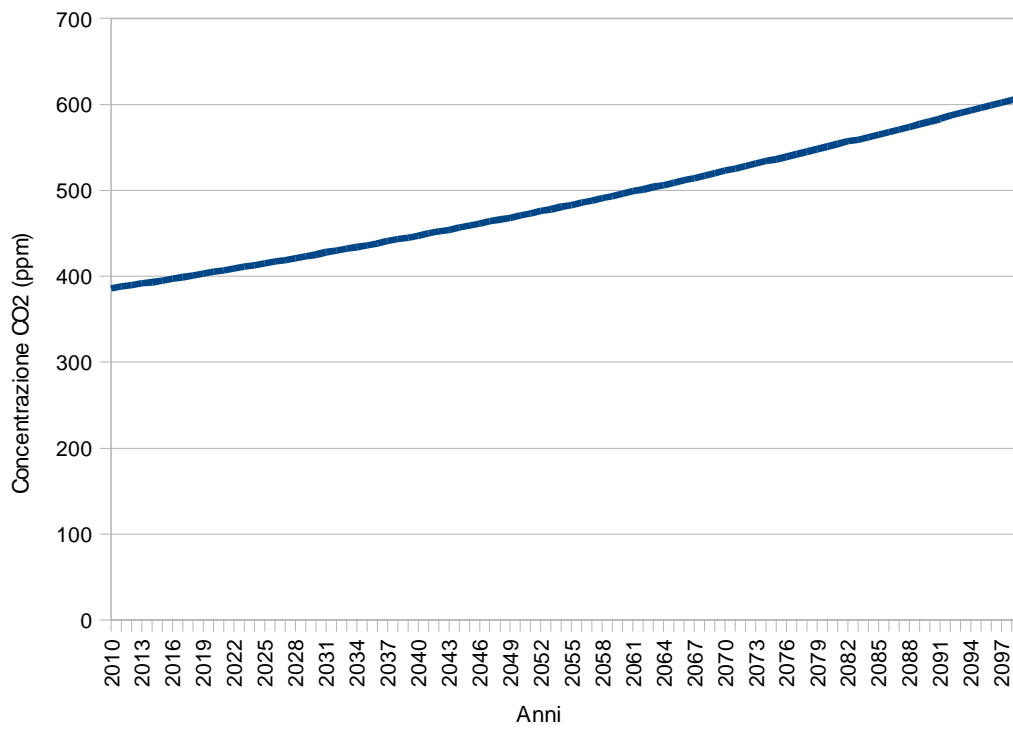


Figura 3.15 - Andamento della concentrazione della CO₂ nel corso della simulazione.

4 RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 CARATTERIZZAZIONE PEDOLOGICA

Di seguito si riportano le principali informazioni ottenute grazie all'apertura dei profili pedologici e derivanti dalle analisi fisico chimiche dei campioni prelevati (tabelle 4.1, 4.2 e 4.3). Tali tabelle sono riferite esclusivamente ai profili utilizzati per le simulazioni con il modello EPIC in quanto considerati maggiormente rappresentativi per ciascuna tipologia di uso del suolo considerata.

Nella tabella 4.1 sono riportate le principali informazioni derivanti dall'escavazione dei profili come la pendenza ed esposizione del sito in cui è stato aperto il profilo pedologico, il numero e la tipologia degli orizzonti pedologici individuati, il loro spessore e profondità e la loro classificazione.

Nelle tabelle 4.2 e 4.3 sono riportati i risultati delle analisi fisico-chimiche condotte sui campioni di terreno prelevati, per ogni profilo, da ogni orizzonte individuato.

L'area destinata a pascolo è risultata caratterizzata da pendenza limitata, ad esclusione delle aree in corrispondenza dei profili 11 e 12. In generale, le pendenze raggiunte risultano superiori rispetto a quelle relative alla superficie destinata alla coltivazione dell'erbaio. Inoltre, la superficie del pascolo risulta maggiormente variabile dal punto di vista orografico, come emerge dalla variabile esposizione dei siti in cui è avvenuta l'escavazione dei profili pedologici. La tessitura del terreno consente un rapido drenaggio e di conseguenza, il ristagno idrico può essere considerato assente. Nella superficie destinata a pascolo il suolo è caratterizzato da una potenza superiore rispetto a quello destinato ad erbaio. La presenza dell'orizzonte Ap nei profili pedologici escavati nel sito generalmente destinato alla realizzazione del pascolo è da attribuirsi alla lavorazione effettuata in concomitanza con la destinazione periodica della superficie ad erbaio e realizzata quando, in seguito a fenomeni di degradazione della cotica, la composizione floristica naturale risulta particolarmente povera di specie pabulari.

Tabella 4.1 - Schema riassuntivo dei risultati relativi ai profili aperti nei sistemi colturali presi in considerazione.

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 Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							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 Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							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 Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							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 Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							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 Dystrocherepts	Endoleptic Cambisols Dystric
							BC	35-125 / 90		
							C	>125 / "		
13	32T 524733-4518581	307	6 - 12	NE (40° N)	ben drenato	ERBAIO	Ap	0-35 / 35	Typic Dystrocherepts	Epileptic Cambisols Dystric
							Bw	35-45÷66 / 10÷31		
							C	45÷66-110 / 44÷65		

ID profilo	Coordinate UTM	Quota (m s.l.m.)	Pendenza (%)	Esposizione	Drenaggio	Uso del suolo	Orizzonti		Classificazione	
14	32T 524767-4518612	306	6 - 12	NE (40° N)	ben drenato	ERBAIO	A	0-25 / 25	Typic Dystrochrepts	Epileptic Cambisols Dystric
							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 Dystrochrepts	Epileptic Cambisols Dystric
							Bw	35-85÷100 / 50÷65		
							C	100-110 / 10		
							R	> 110 / "		
16	32T 524787-4518698	304	2 - 6	NE (50° N)	ben drenato	ERBAIO	A1	0-14 / 14	Typic Dystrochrepts	Epileptic Cambisols Dystric
							A2	14-38 / 24		
							BC	38-120 / 82		
							C	> 120 / "		

Tabella 4.2 - 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 4.3 - 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

Si riportano di seguito (Tabella 4.4) i risultati della determinazione della densità apparente calcolata per tutti i profili scavati all'interno del pascolo e dell'erbaio. Le tabelle riportano sia i risultati riferiti al campione tal quale che quelli derivanti dalla correzione del valore di densità apparente in base al contenuto di scheletro di ogni campione. I dati di densità apparente non corretti per la percentuale di scheletro mostrano un andamento crescente in relazione all'aumento della profondità. Gli alti valori osservati sono in accordo con le densità apparenti caratteristiche dei suoli sabbiosi e con basso contenuto di sostanza organica.

Tabella 4.4 - Schema riassuntivo dei risultati della determinazione della densità apparente.

Uso Suolo	Profilo	Orizzonte	Densità apparente (g/cm³)	Densità apparente campione senza scheletro (g/cm³)
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

4.2 CARATTERIZZAZIONE AGRONOMICA

Di seguito si riportano i risultati ottenuti tramite il campionamento diretto effettuato per la caratterizzazione agronomica degli usi del suolo oggetto di studio.

Il numero di piante/culmi presenti per unità di superficie, l'altezza massima raggiunta dalle piante e il valore massimo del "Leaf Area Index" sono riportati, rispettivamente, in tabella 4.5, 4.6 e 4.7.

Tabella 4.5 - Numero di culmi/piante rilevati per ettaro nei due sistemi colturali considerati.

Specie	Uso suolo Pascolo		Uso suolo Erbaio	
	2007	2008	2007	2008
Avena	299,2			337,6
Loglio	603,2			600,0
Trifoglio	16,1			16,0
Pascolo naturale		1020,0	619,2	

I valori riguardanti l'avena ed il loglio sono riferiti al numero di culmi per ettaro mentre per il trifoglio si fa riferimento al numero di piante per m². Per il pascolo il valore riportato deriva dalla somma calcolata tra il numero di culmi per le graminacee e il numero di piante per le specie non graminacee. Nell'ambito dell'erbaio, il rapporto fra specie è in accordo con quanto programmato nella fase di semina del miscuglio. Per quanto riguarda il pascolo, le densità osservate mostrano differenze in relazione all'effetto dell'intero sistema colturale sulla presenza delle specie spontanee. Le operazioni colturali normalmente condotte influenzano infatti la presenza delle specie spontanee che si insediano al termine della coltivazione dell'erbaio. I dati mostrano come nel sito prevalentemente destinato al pascolo naturale la presenza di una consistente banca del seme garantisca un buon reinsediamento autunnale della cotica erbosa (2008) anche dopo l'annata in cui la superficie è sottoposta a lavorazione e semina dell'erbaio autunno-vernino (2007).

Tabella 4.6 - Altezza massima osservata nelle due annate sulle specie presenti nei sistemi colturali considerati.

Uso suolo	Specie	Altezza (m)
Erbaio	Avena	0,98
	Loglio	1,20
	Trifoglio	0,70
Pascolo		0,73

I valori relativi all'altezza massima raggiunta dalle specie presenti nell'erbaio sono risultati conformi a quanto ci si attendeva non mostrando valori al di fuori della norma. I valori relativi alle specie presenti nel pascolo, ed accorpati in un'unica voce, sono risultati invece elevati a causa delle presenza di specie spinose di grandi dimensioni e caratterizzate da un portamento eretto.

Tabella 4.7 - Valore massimo del Leaf Area Index osservato nelle due annate sulle specie presenti nei sistemi colturali considerati.

Specie	Leaf Area Index
Avena	2,2
Loglio	1,8
Trifoglio	0,8
Pascolo naturale	4,0

I valori massimi di Leaf Area Index registrati per le specie considerate sono risultati tipici dei sistemi colturali presenti nell'area nord orientale della Sardegna. Il maggior valore del LAI dell'avena rispetto al loglio, nonostante una densità di steli doppia a favore del loglio, è da attribuire sia alle minori esigenze dal punto di vista fisico-chimico del terreno che alle caratteristiche morfologiche dell'avena la quale è caratterizzata non solo da un maggior numero (elevato numero di nodi) ma anche da foglie aventi una lamina più larga rispetto a quelle del loglio.

Di seguito si riportano i valori di sostanza secca osservati per ciascuna specie e per ciascun profilo (tabella 4.8) e quelli derivanti dalla correzione effettuata per

tener conto della quantità di fitomassa asportata durante il pascolamento (tabella 4.9).

Tabella 4.8 - Sostanza secca prodotta per unità di superficie (t/ha) determinata mediante campionamento sull'erbaio.

	Profilo n° 8		Profilo n° 11		Profilo n° 13		Profilo n° 15	
	2007 (erbaio)	2008 (pascolo)	2007 (erbaio)	2008 (pascolo)	2007 (pascolo)	2008 (erbaio)	2007 (pascolo)	2008 (erbaio)
Avena	2,357		1,974			3,743		3,286
Loglio	2,512		3,794			3,106		3,659
Trifoglio	0,831		0,849			0,907		1,377

Tabella 4.9 - Sostanza secca prodotta per unità di superficie (t/ha) corretta per le asportazioni dovute al pascolamento sull'erbaio.

	Profilo n° 8		Profilo n° 11		Profilo n° 13		Profilo n° 15	
	2007 (erbaio)	2008 (pascolo)	2007 (erbaio)	2008 (pascolo)	2007 (pascolo)	2008 (erbaio)	2007 (pascolo)	2008 (erbaio)
Avena	2,504		2,121			3,743		3,433
Loglio	2,653		3,935			3,247		3,800
Trifoglio	0,880		0,898			0,956		1,426

I valori di sostanza secca osservati sono risultati tipici dei sistemi colturali oggetto di studio presenti nell'area di indagine. È possibile osservare come le produzioni si siano attestate, per le tre specie presenti nell'erbaio, su valori maggiori nel 2008 rispetto al 2007. Variazioni più ampie sono state riscontrate per per l'avena mentre le produzioni relative al trifoglio sono risultate più stabili. Tale situazione è attribuibile alle condizioni meteorologiche più favorevoli verificatesi nel 2008, anno in cui si è verificata una maggiore piovosità nel periodo tardo primaverile. Tale disponibilità idrica ha consentito un maggiore sviluppo di quelle colture che, più di altre, ne hanno tratto beneficio.

4.3 VALIDAZIONE DEL MODELLO

I valori delle produzioni scaturiti dalle simulazioni sono stati confrontati con i valori rilevati in campo e quindi sottoposti ad analisi statistica tramite l'utilizzo del software IRENE. Tale procedimento si è basato sia sull'analisi delle differenze esistenti tra i valori osservati e quelli simulati, che sull'analisi della correlazione tra valori osservati e simulati.

Nelle tabelle 4.10, 4.11 4.12 e 4.13 si riportano alcuni dei dati di output forniti dal modello EPIC e relativi alle produzioni medie annuali.

La simulazione con la quale sono stati ottenuti i valori riportati nelle tabelle ha come anno di inizio il 2006 ed è stata preceduta da una pre-simulazione avente una durata di 10 anni. Per la calibrazione sono stati utilizzati i dati osservati relativi agli anni 2007 e 2008, anni in cui sono state effettuate le rilevazioni in campo. Sulle stesse annate è stato effettuato, mediante analisi statistica, il controllo della qualità della calibrazione.

Tabella 4.10 - Output riferito al profilo numero 8.

Run	Year	Crop Full Name	Forage Yield (t/ha)	Crop Biomass (t/ha)	Water stress (days)	Nitrogen stress (days)	PlanDate	f Harvest date
177	2006	Winter Pasture	0	0	0	0	0	1642
177	2006	Oats	0	0	11,01	0	20061027	0
177	2006	Annual Rye Grass	0	0	4,56	0	20061101	0
177	2006	Red Clover	0	0	3,88	0	20061102	0
177	2007	Oats	2,41	4,13	46,22	13,36	20061027	20070601
177	2007	Annual Rye Grass	2,77	4,78	47,32	68,8	20061101	20070601
177	2007	Red Clover	0,94	1,51	0	0	20061102	20070601
177	2007	Winter Pasture	0,66	3,1	6,5	0	20071001	20071231
177	2008	Winter Pasture	5,35	5,22	13,58	0	20071001	20080601
177	2008	Winter Pasture	0	1,34	0,1	0	20081001	0

Tabella 4.11 - Output riferito al profilo numero 11.

Run	Year	Crop Full Name	Forage Yield (t/ha)	Crop Biomass (t/ha)	Water stress (days)	Nitrogen stress (days)	PlanDate	f Harvest date
178	2006	Winter Pasture	0	0	0	0	0	1642
178	2006	Oats	0	0	7,6	0	20061027	0
178	2006	Annual Rye Grass	0	0	5,07	0	20061101	0
178	2006	Red Clover	0	0	3,52	0	20061102	0
178	2007	Oats	2,16	3,7	46,82	20,56	20061027	20070601
178	2007	Annual Rye Grass	4,37	7,32	43,92	58,34	20061101	20070601
178	2007	Red Clover	0,93	1,49	0	0	20061102	20070601
178	2007	Winter Pasture	0,66	2,99	9,96	0	20071001	20071231
178	2008	Winter Pasture	5,27	5,21	5,49	0	20071001	20080601
178	2008	Winter Pasture	0	1,34	0,04	0	20081001	0

Tabella 4.12 - Output riferito al profilo numero 13.

Run	Year	Crop Full Name	Forage Yield (t/ha)	Crop Biomass (t/ha)	Water stress (days)	Nitrogen stress (days)	PlanDate	f Harvest date
159	2006	Annual Rye Grass	0	0	0	0	0	1613
159	2006	Red Clover	0	0	0	0	0	1613
159	2006	Oats	0	0	0	0	0	1613
159	2006	Winter Pasture	0,68	2,27	3,42	0	20061001	20061231
159	2007	Winter Pasture	3,37	3,81	77,58	0	20061001	20070513
159	2007	Oats	0	0	0,32	0	20071027	0
159	2007	Red Clover	0	0	0,28	0	20071101	0
159	2007	Annual Rye Grass	0	0	0	0	20071101	0
159	2008	Oats	3,66	6,19	34,48	30,83	20071027	20080601
159	2008	Oats	0	0	0	0	20081027	0
159	2008	Red Clover	0,9	1,46	47,28	3,02	20071101	20080601
159	2008	Red Clover	0	0	0	0	20081101	0
159	2008	Annual Rye Grass	3,75	6,36	29,94	74,02	20071101	20080601
159	2008	Annual Rye Grass	0	0	0	1	20081101	0

Tabella 4.13 - Output riferito al profilo numero 15.

Run	Year	Crop Full Name	Forage Yield (t/ha)	Crop Biomass (t/ha)	Water stress (days)	Nitrogen stress (days)	PlanDate	f Harvest date
144	2006	Annual Rye Grass	0	0	0	0	0	1613
144	2006	Red Clover	0	0	0	0	0	1613
144	2006	Oats	0	0	0	0	0	1613
144	2006	Winter Pasture	0,68	2,27	4,84	0	20061001	20061231
144	2007	Winter Pasture	3,69	4,12	61,97	0	20061001	20070524
144	2007	Oats	0	0	0,02	0	20071027	0
144	2007	Red Clover	0	0	0,01	0	20071101	0
144	2007	Annual Rye Grass	0	0	0	0	20071101	0
144	2008	Oats	3,46	5,88	24,17	42,43	20071027	20080601
144	2008	Oats	0	0	0	0	20081027	0
144	2008	Red Clover	1,48	2,36	0	0,05	20071101	20080601
144	2008	Red Clover	0	0	0	0	20081101	0
144	2008	Annual Rye Grass	4,48	7,55	16,81	73,79	20071101	20080601
144	2008	Annual Rye Grass	0	0	0	1	20081101	0

In tabella 4.14 sono riportati i valori osservati e quelli derivanti dalla simulazione riferiti agli anni 2007 e 2008 per le specie presenti nei sistemi colturali presi in esame.

Tabella 4.14 - Dati produttivi osservati e simulati per le colture presenti nei sistemi colturali oggetto di studio.

N° Profilo	Anno	Coltura	Simulati (t/ha)	Osservati (t/ha)
8	2007	Loglio	2,77	2,65
11	2007	Loglio	4,37	3,94
13	2008	Loglio	3,75	3,25
15	2008	Loglio	4,48	3,8
8	2007	Avena	2,41	2,5
11	2007	Avena	2,16	2,12
13	2008	Avena	3,66	3,74
15	2008	Avena	3,46	3,43
8	2007	Trifoglio	0,94	0,88
11	2007	Trifoglio	0,93	0,9
13	2008	Trifoglio	0,9	0,96
15	2008	Trifoglio	1,48	1,43
8	2008	Pascolo	6,01	6
11	2008	Pascolo	5,93	6
13	2007	Pascolo	4,05	4
15	2007	Pascolo	4,37	4

L'analisi statistica degli output forniti dal modello è stata condotta utilizzando il software IRENE e con un valore soglia di probabilità pari al 5%. L'analisi è stata effettuata separatamente per il pascolo e per tutte le specie presenti nel miscuglio dell'erbaio.

I risultati delle analisi statistiche sono riportati nelle tabelle 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 e nelle figure 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabella 4.15 - Risultati delle analisi condotte con il software IRENE sui dati osservati e simulati riferiti al loglio.

Estimated : Forage Yield (t/ ha)			X_Variable: Measured (Osservati Loglio)			
Measured : Osservati Loglio			Y_Variable: Estimated (Forage Yield (t/ ha))			
			P_Level: 0.05			
Index	Index Value	Optimum		value	P(t) = 0	P(t) = 1
SB	0,1903	0	r	0,9831	0,0169	
RMSV	0,2027	0	intercept_LS	-0,6406	0,3959	
RMSE	0,4810	0	slope_LS	1,3159	0,0169	0,2101
GSD	0,0888	0	intercept_RMA	-0,7178	0,4967	
NMSE	0,0172	0	slope_RMA	1,3386	0,0083	0,1099
EF	0,0991	1				
d	0,8588	1	P(F_LS) intercept = 0 & slope = 1	0,0760		
			P(F_RMA) intercept = 0 & slope = 1	0,0728		
MBE	0,4363	0				
			RMSEs_LS	0,4647		
EF1	0,0490	1	RMSEs_RMA	0,4688		
P(t)	0,0336		RMSEu_LS	0,1243		
			RMSEu_RMA	0,1248		

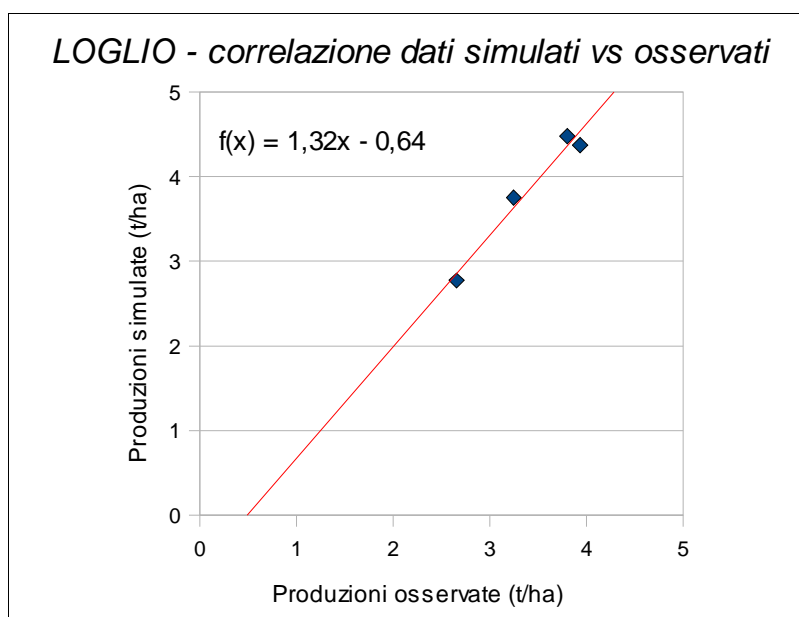


Figura 4.1 - Correlazione dati simulati vs osservati riferiti al loglio.

L'analisi della correlazione esistente tra i dati simulati e osservati riferiti al loglio, per i due anni e per i 4 profili considerati, ha mostrato un valore di "r" pari a 0,9831 con valori di pendenza ed intercetta rispettivamente pari a 1,32 e -0,64.

Per il loglio si ha un valore di "r" pari a 0,9831 con valori di pendenza ed intercetta rispettivamente pari a 1,32 e -0,64. Hinkle *et al.* (1994) propone differenti categorie tramite le quali è possibile dare una rapida interpretazione della correlazione esistente tra i valori in base al valore di "r" senza utilizzare una base statistica. Le categorie proposte sono:

- 0,0 – 0,3: correlazione minima;
- 0,3 – 0,5: debole correlazione;
- 0,5 - 0,7: correlazione moderata;
- 0,7 – 0,9: forte correlazione;
- 0,9 – 1,0 correlazione molto forte.

Nel caso del loglio in base al valore di "r" è possibile dire che tra i dati osservati e quelli simulati esista una alta correlazione.

Tabella 4.16- Risultati delle analisi condotte con il software IRENE sui dati osservati e simulati riferiti all'avena.

Estimated : Forage Yield (t/ ha)			X_Variable: Measured (Osservati Avena)			
Measured : Osservati Avena			Y_Variable: Estimated (Forage Yield (t/ ha))			
			P_Level: 0.05			
Index	Index Value	Optimum		value	P(t) = 0	P(t) = 1
SB	0,0007	0	r	0,9959	0,0041	
RMSV	0,0609	0	intercept_LS	0,0458	0,8316	
RMSE	0,0665	0	slope_LS	0,9754	0,0041	0,7328
GSD	0,0114	0	intercept_RMA	0,0340	0,9135	
NMSE	0,0005	0	slope_RMA	0,9794	0,0020	0,6883
EF	0,9899	1				
d	0,9974	1	P(F_LS) intercept = 0 & slope = 1	0,8804		
			P(F_RMA) intercept = 0 & slope = 1	0,8885		
MBE	-0,0268	0				
			RMSEs_LS	0,0313		
EF1	0,9047	1	RMSEs_RMA	0,0300		
P(t)	0,5019		RMSEu_LS	0,0587		
			RMSEu_RMA	0,0587		

AVENA - correlazione dati stimati vs osservati

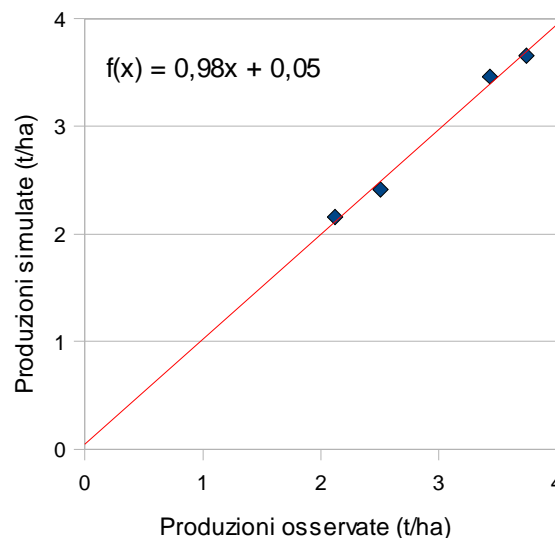


Figura 4.2 - Correlazione dati simulati vs osservati riferiti all'avena.

Per l'avena si ha un valore di "r" pari a 0,9959, tale valore rientra, tra le categorie precedentemente elencate, in quella relativa ad una stretta correlazione tra i dati.

L'equazione della retta di correlazione ha valori di pendenza ed intercetta rispettivamente pari a 0,05 e 0,98, valori molto vicini a quelli ottimali per una perfetta correlazione di 0 e 1.

Tabella 4.17 - Risultati delle analisi condotte con il software IRENE sui dati osservati e simulati riferiti al trifoglio.

Estimated : Forage Yield (t/ ha)			X_Variable: Measured (Osservati Trifoglio)			
Measured : Osservati Trifoglio			Y_Variable: Estimated (Forage Yield (t/ ha))			
			P_Level: 0.05			
Index	Index Value	Optimum		value	P(t) = 0	P(t) = 1
SB	0,0004	0	r	0,9832	0,0168	
RMSV	0,0450	0	intercept_LS	-0,0289	0,8615	
RMSE	0,0497	0	slope_LS	1,0480	0,0168	0,7603
GSD	0,0051	0	intercept_RMA	-0,0476	0,8813	
NMSE	0,0021	0	slope_RMA	1,0659	0,0082	0,5678
EF	0,9511	1				
d	0,9885	1	P(F_LS) intercept = 0 & slope = 1	0,8610		
			P(F_RMA) intercept = 0 & slope = 1	0,8358		
MBE	0,0210	0				
			RMSEs_LS	0,0236		
EF1	0,7487	1	RMSEs_RMA	0,0257		
P(t)	0,4782		RMSEu_LS	0,0437		
			RMSEu_RMA	0,0439		

TRIFOGLIO - correlazione dati stimati vs osservati

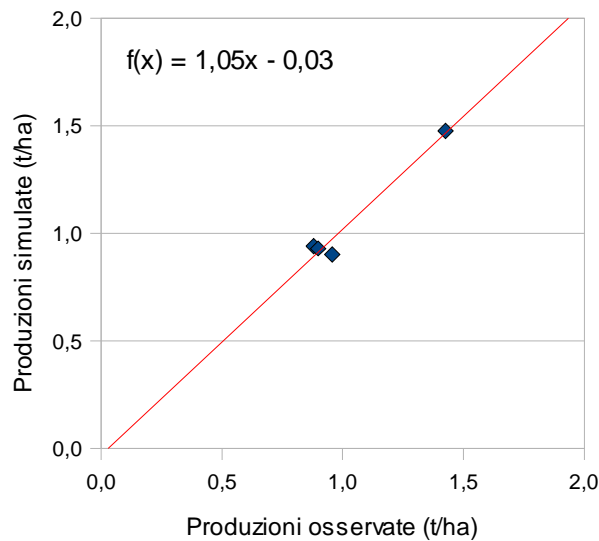


Figura 4.3 - Correlazione dati simulati vs osservati riferiti al trifoglio.

Nel caso del trifoglio il valore di "r" è stato pari a 0,9832, con valori di pendenza ed intercetta della retta di correlazione rispettivamente di 1,05 e -0,03. Anche per il trifoglio tra i dati osservati e quelli derivanti dalla simulazione si ha una correlazione molto stretta indicando quindi l'efficacia della simulazione.

Tabella 4.18 - Risultati delle analisi condotte con il software IRENE sui dati osservati e simulati riferiti al pascolo.

Estimated : Forage Yield (t/ ha)			X_Variable: Measured (Osservati Pascolo)			
Measured : Osservati Pascolo			Y_Variable: Estimated (Forage Yield (t/ ha))			
			P_Level: 0.05			
Index	Index Value	Optimum		value	P(t) = 0	P(t) = 1
SB	0,0081	0	r	0,9913	0,0087	
RMSV	0,1680	0	intercept_LS	0,6935	0,2413	
RMSE	0,1905	0	slope_LS	0,8793	0,0087	0,2812
GSD	0,0426	0	intercept_RMA	0,6549	0,3862	
NMSE	0,0014	0	slope_RMA	0,8870	0,0043	0,1926
EF	0,9637	1				
d	0,9898	1	P(F_LS) intercept = 0 & slope = 1	0,6066		
			P(F_RMA) intercept = 0 & slope = 1	0,6248		
MBE	0,0897	0				
			RMSEs_LS	0,1505		
EF1	0,8753	1	RMSEs_RMA	0,1443		
P(t)	0,4230		RMSEu_LS	0,1168		
			RMSEu_RMA	0,1170		

PASCOLO - correlazione dati simulati vs osservati

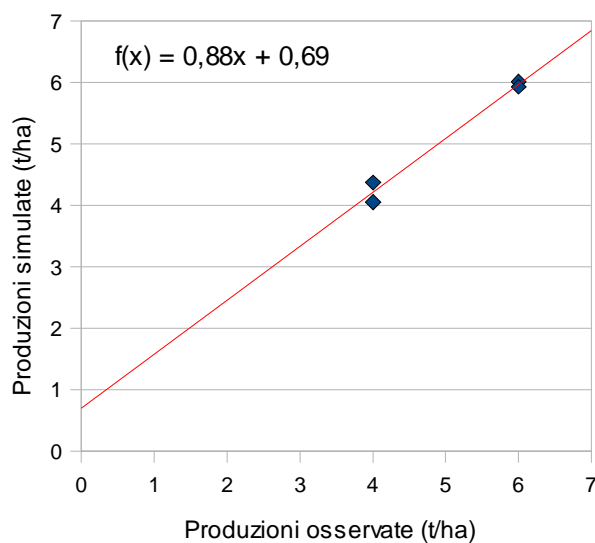


Figura 4.4 - Correlazione dati simulati vs osservati riferiti al pascolo.

Anche in questo caso l'analisi statistica per il confronto tra dati simulati ed osservati per il pascolo ha messo in evidenza una stretta correlazione tra i valori. È stato infatti ottenuto un valore di "r" pari a 0,9913 e valori di pendenza ed

intercetta della retta di correlazione rispettivamente di 0,88 e 0,69.

4.2 SIMULAZIONE DELLA DINAMICA DELLA SOSTANZA ORGANICA NEL SUOLO

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte per lo studio della dinamica della sostanza organica nel suolo.

Le figure riportate sono riferite ai profili pedologici scavati nelle due aree di studio caratterizzate da un differente uso del suolo e riportano l'andamento del contenuto di carbonio nei tre differenti pool di sostanza organica considerati dal modello EPIC. Si ricorda che questi sono denominati "Biomass", "Slow pool" e "Passive pool" e sono rispettivamente caratterizzati da un turnover di poche settimane, decine di anni e centinaia di anni.

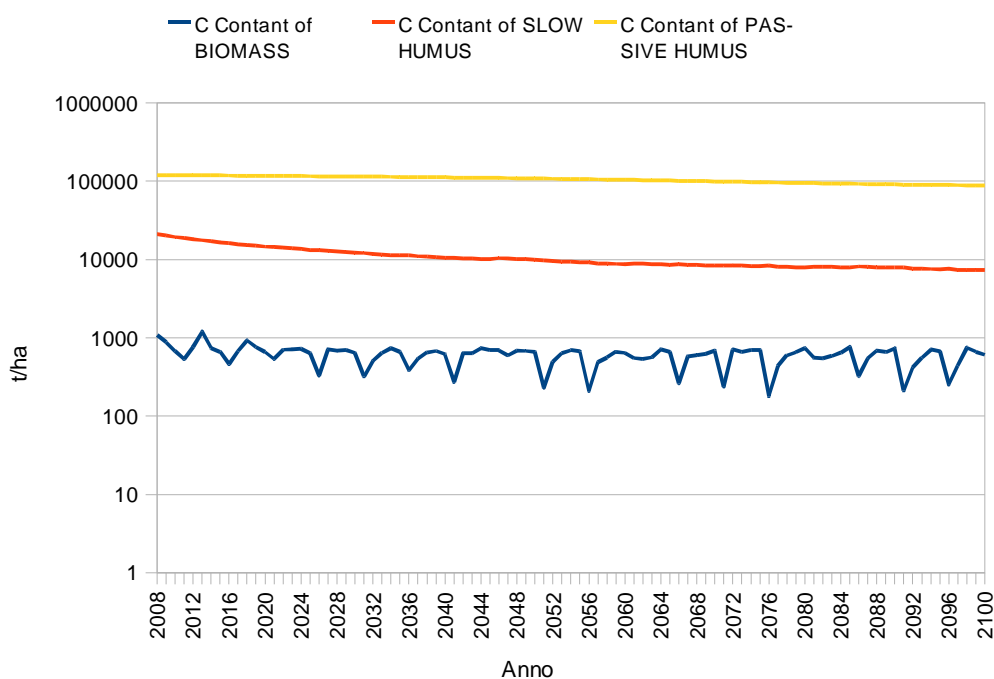


Figura 4.5 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool per il profilo 8 (0-94 cm) realizzato nel sito prevalentemente destinato a pascolo.

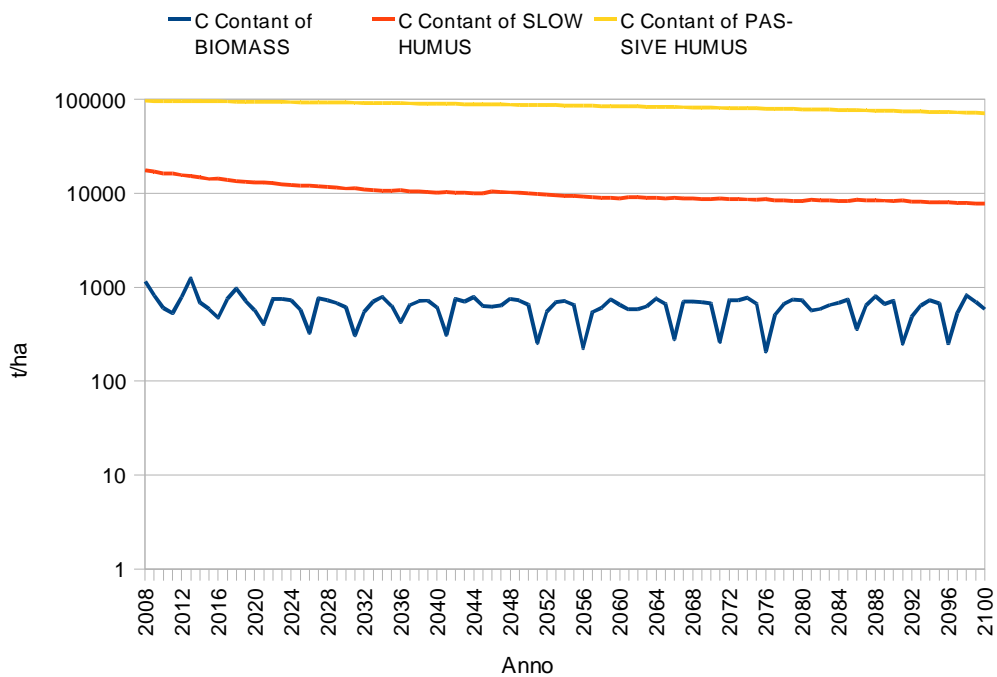


Figura 4.6 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool per il profilo II (0-134 cm) realizzato nel sito prevalentemente destinato a pascolo.

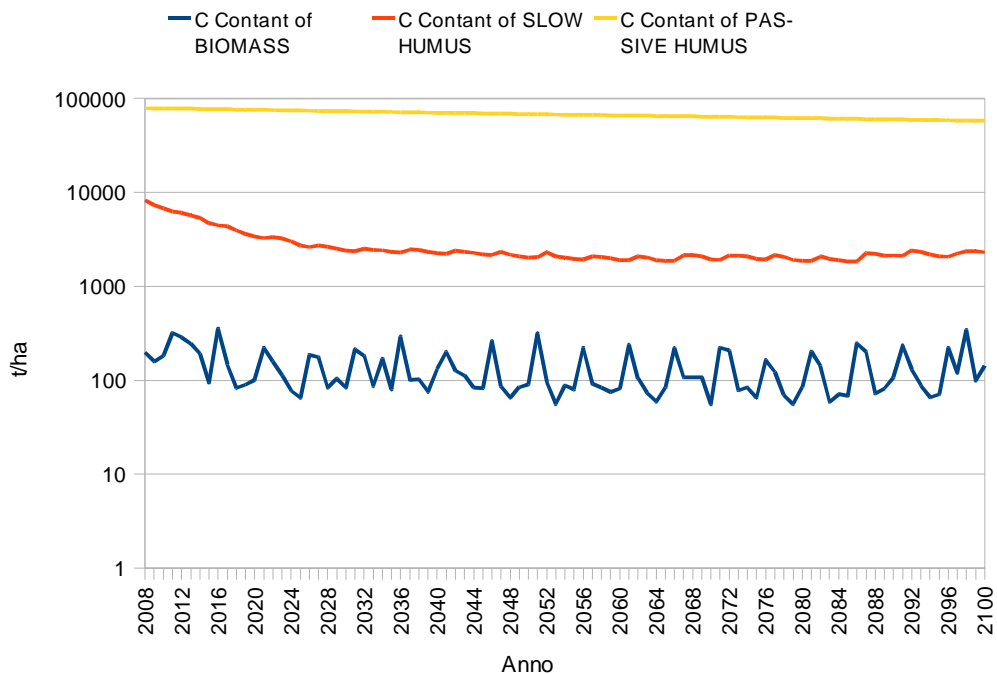


Figura 4.7 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool per il profilo 13 (0-54 cm) realizzato nel sito prevalentemente destinato alla coltivazione dell'erbaio.

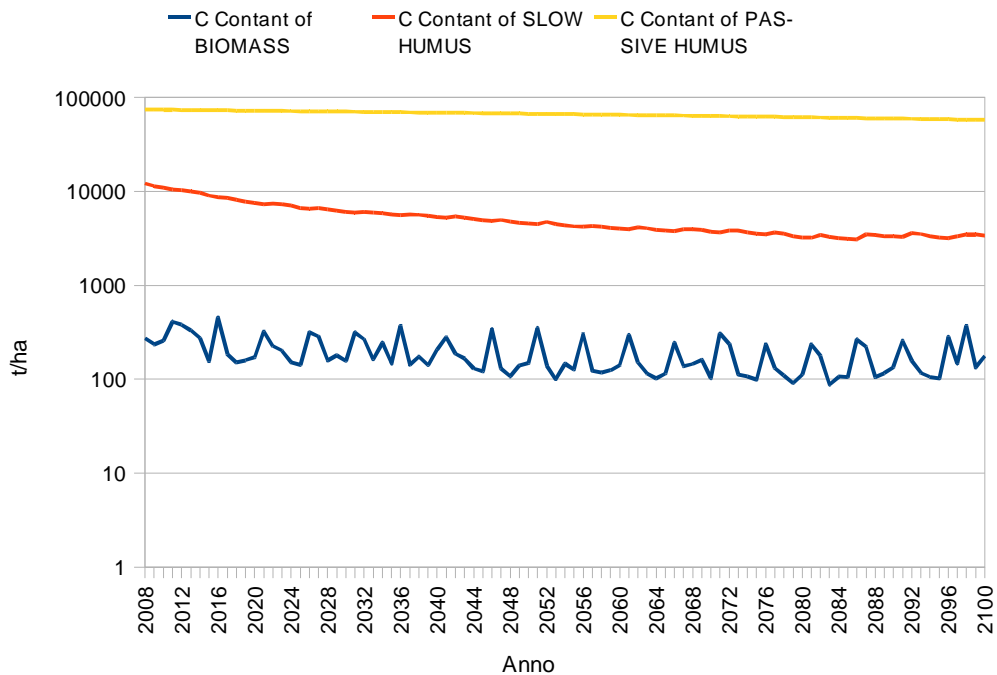


Figura 4.8 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool per il profilo 15 (0-82 cm) realizzato nel sito prevalentemente destinato alla coltivazione dell'erbaio.

In tutti i profili presi in esame la simulazione ha mostrato come la componente principale della sostanza organica del terreno sia costituita dalla frazione con la più lenta velocità di degradazione mentre la componente microbica della sostanza organica si è costantemente rivelata quella minoritaria. In posizione intermedia si è sempre collocata la frazione "slow humus" caratterizzata da una velocità di turnover intermedia tra i tre pool.

Per poter paragonare tra loro i differenti profili dal punto di vista del contenuto di carbonio nei differenti pool è stata calcolata, per i tre pool utilizzati dal modello, la quantità di carbonio contenuta nei primi 40 cm di profondità del terreno di cui si riporta la dinamica nel tempo (figure 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12).

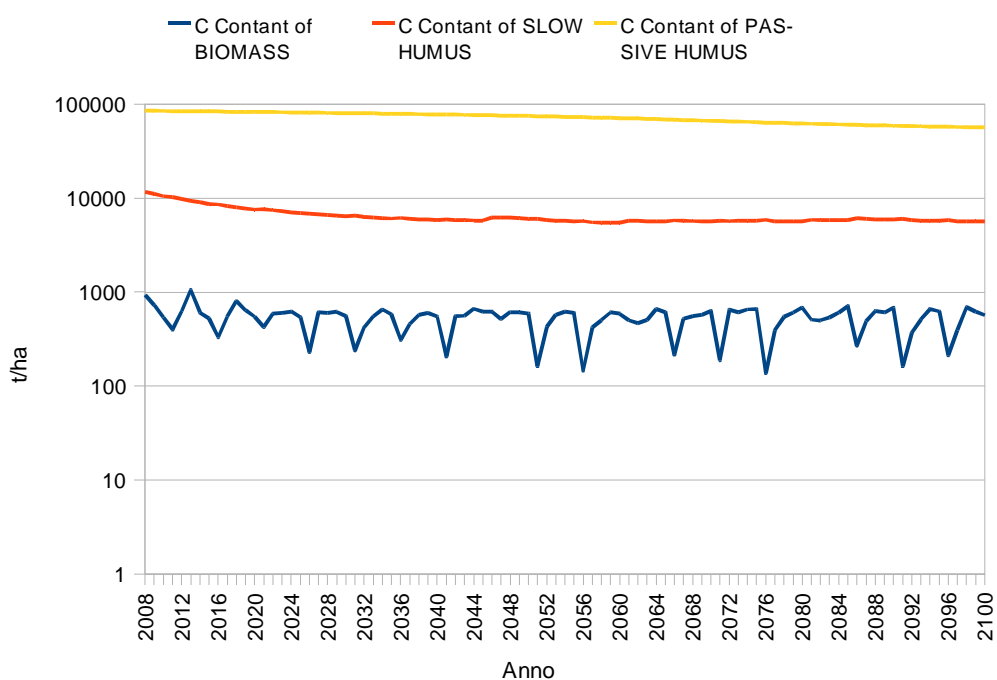


Figura 4.9 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool nei primi 40 cm di profondità del profilo 8 realizzato nel sito prevalentemente destinato a pascolo.

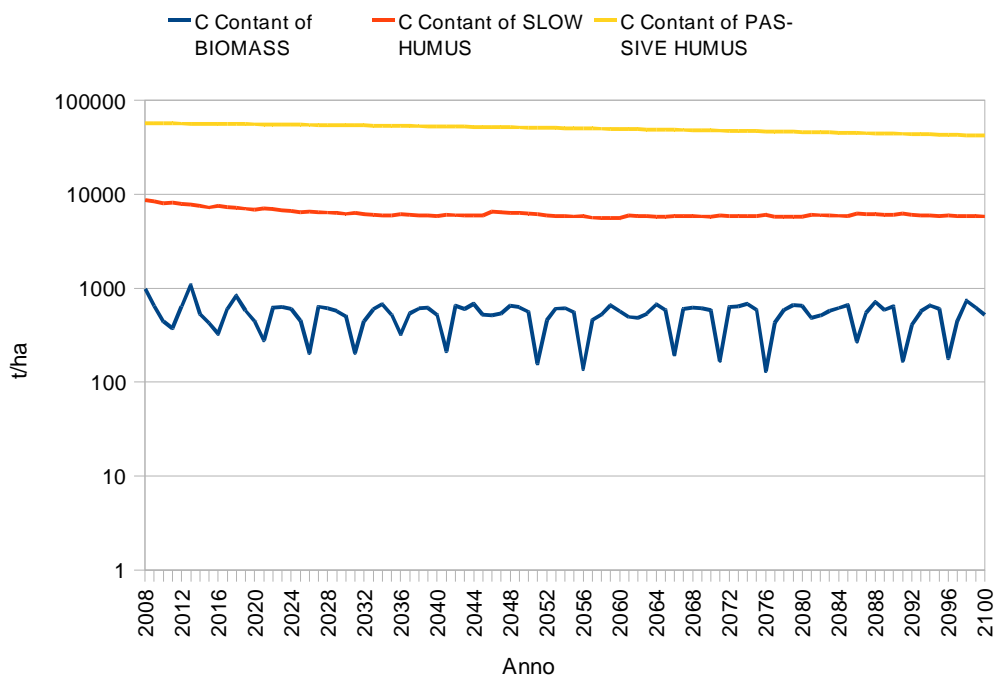


Figura 4.10 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool nei primi 40 cm di profondità del profilo II realizzato nel sito prevalentemente destinato a pascolo.

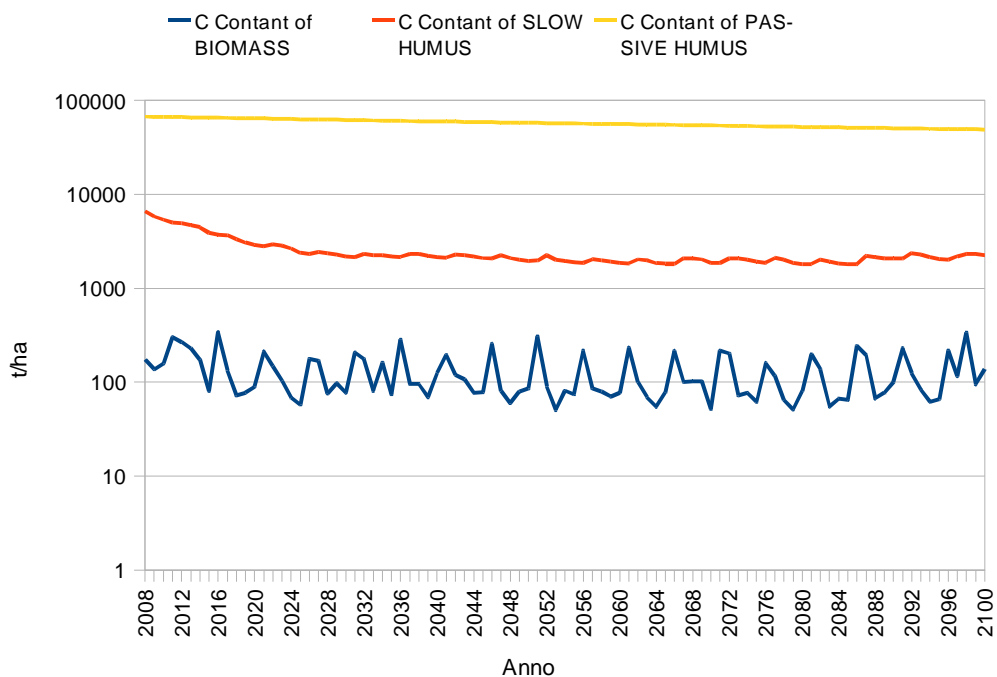


Figura 4.11 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool nei primi 40 cm di profondità del profilo 13 realizzato nel sito prevalentemente destinato alla coltivazione dell'erbaio.

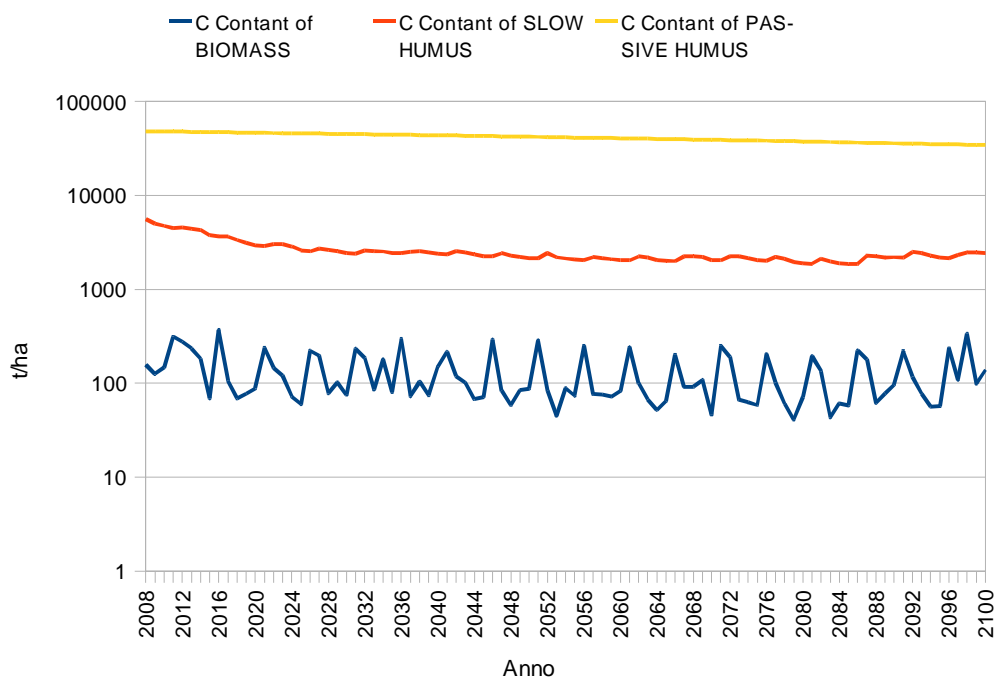


Figura 4.12 - Dinamica del contenuto di carbonio nei tre pool nei primi 40 cm di profondità del profilo 15 realizzato nel sito prevalentemente destinato alla coltivazione dell'erbaio.

Anche in questo caso la componente principale della sostanza organica presente nel terreno si è rivelata la frazione del "passive humus", la seconda quella dello "slow humus" mentre la frazione "biomass" si è sempre rivelata la componente meno con il più basso contenuto di carbonio.

Analizzando la tendenza nel tempo del contenuto di carbonio nei singoli pool emerge come il "biomass pool" si mantenga ad un livello costante negli anni. Il pool "slow humus" mostra invece una riduzione nei primi anni per poi tendere ad una stabilizzazione del suo contenuto di carbonio. Tale andamento si riscontra sia nel sito destinato prevalentemente alla coltivazione dell'erbaio che in quello destinato al pascolo naturale. Nelle simulazioni aventi durata di circa 100 anni (2008 – 2100) il pool "passive humus" ha sempre mostrato una progressiva diminuzione del contenuto di carbonio mostrando una tendenza alla sua stabilizzazione solamente nella simulazione riguardante il profilo numero 8 riferito all'uso suolo pascolo.

Gli andamenti osservati per il contenuto di carbonio in tutti i pool presi in considerazione sono da attribuirsi all'effetto che le lavorazioni del terreno hanno sulla sostanza organica del suolo che, a causa del disturbo generato sul sistema, ne determinano la riduzione.

Per visualizzare meglio le differenze nel contenuto di carbonio dei tre pool sia ra i differenti profili che tra i due usi del suolo presi in esame, è stato confrontato e analizzato il contenuto di carbonio dei singoli pool nei primi 40 cm di ciascun profilo.

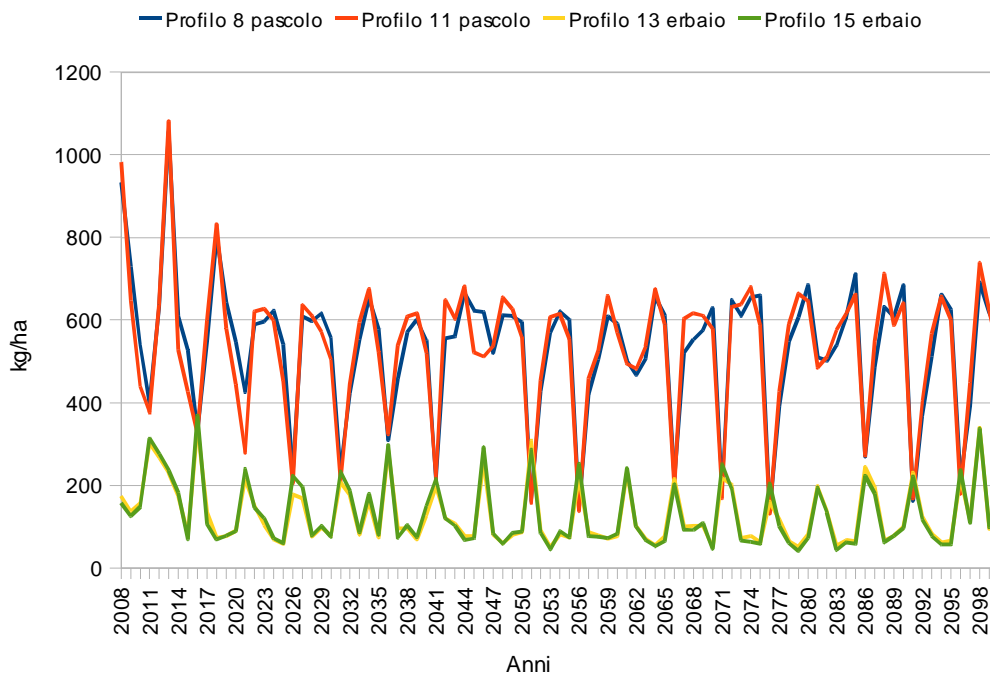


Figura 4.13 - Dinamica del contenuto di carbonio nel pool "biomass" per i primi 40 cm dei 4 profili.

Tabella 4.19 - Medie e risultati dell'analisi della varianza riferiti al contenuto di carbonio del pool "biomass" nei 4 profili.

	SITO	PROFILO	MEDIA
Pascolo		P 8	532,88 a
		P 11	531,35 a
Erbaio		P 13	128,53 b
		P15	129,69 b

* le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

L'analisi della varianza condotta sui valori medi osservati per i diversi profili ha messo in evidenza differenze statisticamente significative per il contenuto di

carbonio del "biomass pool" tra i due siti presi in esame. In particolare il maggior contenuto di carbonio è stato riscontrato nei profili relativi all'area di studio destinata prevalentemente al pascolo. Nessuna differenza significativa è emersa tra i profili pedologici riferiti allo stesso uso suolo.

È interessante evidenziare come i picchi corrispondenti al contenuto minimo e massimo di carbonio, rispettivamente nei profili del pascolo e dell'erbaio, corrispondano agli anni in cui avviene lo scambio del sistema colturale tra i due siti (es. anni 2012, 2017, 2022, etc.). Questo andamento riflette l'influenza che le lavorazioni effettuate per la semina dell'erbaio hanno sul contenuto di carbonio del pool più labile e come la non lavorazione abbia un effetto opposto consentendo il graduale accumulo di carbonio nel suolo.

Infatti per l'area di studio destinata prevalentemente alla realizzazione dell'erbaio le continue lavorazioni del terreno causano la diminuzione del contenuto di carbonio per via della più rapida mineralizzazione della sostanza organica. Negli anni in cui tale area di studio viene destinata alla realizzazione del pascolo naturale, la mancata lavorazione del terreno permette l'accumulo nel terreno di sostanza organica. Situazione opposta si ha ovviamente nel pascolo dove si ha un incremento del contenuto di carbonio nel "biomass pool" negli anni in cui il terreno viene destinato alla realizzazione del pascolo, mentre negli anni in cui avviene la coltivazione dell'erbaio si ha la riduzione del contenuto di carbonio in seguito alle lavorazioni effettuate per la messa a coltura.

Possiamo inoltre osservare come sia differente l'effetto della lavorazione o meno del terreno sul contenuto di carbonio nel pool "biomass": infatti nell'area di studio destinata alla coltivazione dell'erbaio gli incrementi del contenuto di carbonio negli anni in cui non avviene la lavorazione risultano minimi se paragonati alla diminuzione del contenuto di carbonio che si osserva nel pascolo negli anni in cui vengono effettuate le lavorazioni per la semina dell'erbaio mostrando quindi come anche un solo anno di lavorazione vada ad influire sulla sostanza organica accumulata nel corso dei quattro anni precedenti.

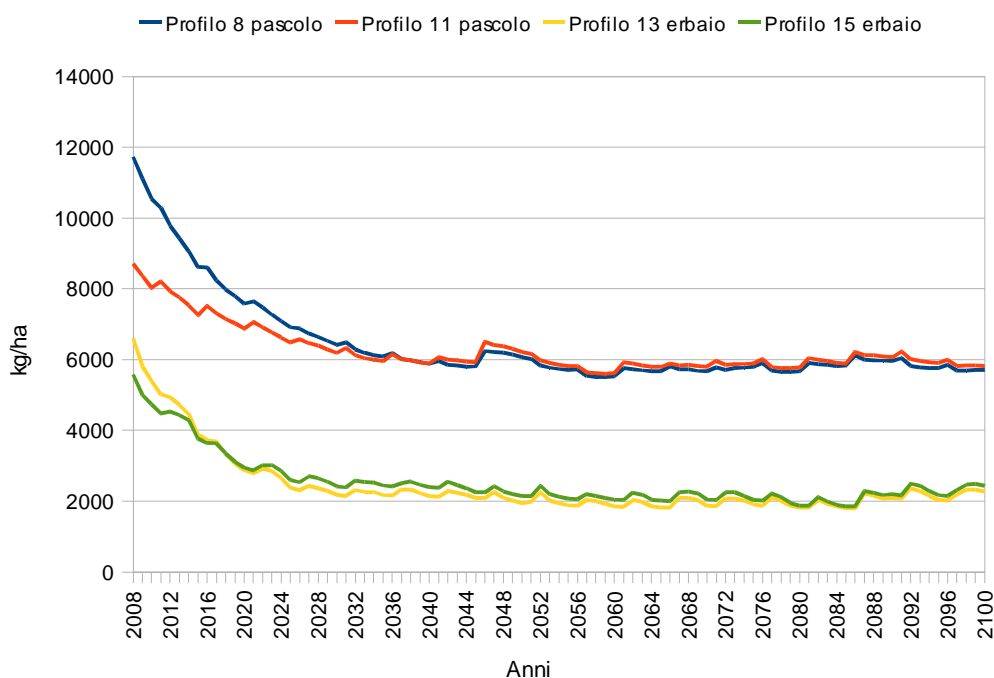


Fig. 4.14 - Dinamica del contenuto di carbonio nel pool "slow humus" per i primi 40 cm dei 4 profili.

Tabella 4.20 - Medie e risultati dell'analisi della varianza riferiti al contenuto di carbonio del pool "slow humus" nei 4 profili.

SITO	PROFILO	MEDIA
Pascolo	P 8	6453,3 a
	P 11	6261,7 a
Erbaio	P 13	2441,1 b
	P 15	2542,9 b

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Per il pool "slow humus" l'analisi della varianza ha messo in evidenza differenze statisticamente significative per il contenuto di carbonio tra le due aree di studio prese in esame; anche in questo l'uso suolo "pascolo" ha mostrato il maggior contenuto di carbonio. Nessuna differenza è emersa invece tra i profili pedologici riferiti allo stesso uso del suolo. L'andamento del contenuto di carbonio nel pool "slow humus" risulta più costante e meno influenzato dalla gestione del sistema colturale rispetto a quanto osservato per il pool "biomass" e questo è dovuto alla

minore velocità di turnover del pool. È comunque ancora possibile osservare l'effetto delle lavorazioni sul contenuto di carbonio, infatti nell'erbaio si osserva una sua progressiva diminuzione negli anni in cui vengono effettuate le lavorazioni per la semina dell'erbaio seguita da un incremento in corrispondenza della non lavorazione per la realizzazione del pascolo naturale.

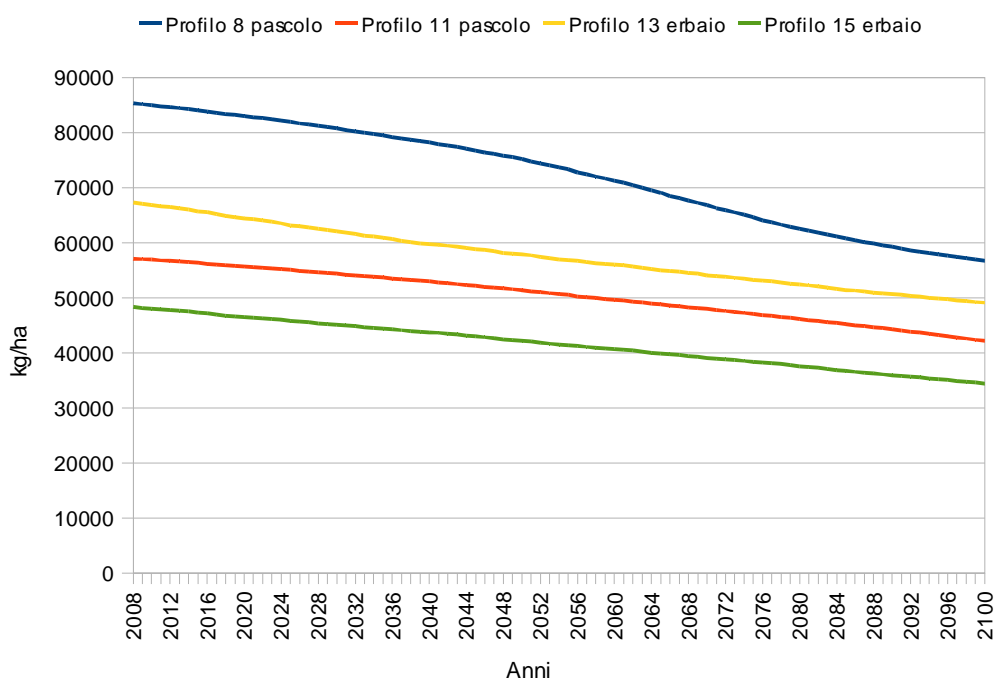


Fig. 4.15 - Dinamica del contenuto di carbonio nel pool "passive humus" per i primi 40 cm dei 4 profili.

Tabella 4.21 - Medie e risultati dell'analisi della varianza riferiti al contenuto di carbonio del pool "passive humus" nei 4 profili.

SITO	PROFILO	MEDIA
Pascolo	P 8	72218,8 a
	P 11	50324,4 c
Erbaio	P 13	57443,5 b
	P15	41467,9 d

* le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Per il pool "passive humus" l'analisi della varianza ha messo in evidenza

differenze significative per il contenuto di carbonio tra tutti i profili presi in esame. In tutti i profili il trend del pool caratterizzato dalla più lenta velocità di degradazione è quello di una costante diminuzione del contenuto di carbonio. Tale andamento è attribuibile al fatto che il pool con turnover più lento, in seguito ad una perturbazione, raggiunga un equilibrio solamente dopo alcune centinaia di anni per cui è probabile che, nella simulazione effettuata e che comprende un arco di tempo complessivi di 130 anni, tale pool ancora non raggiunga un equilibrio e sia quindi visibile la lenta diminuzione della frazione di sostanza organica difficilmente degradabile.

4.3 SIMULAZIONI EFFETTUATE UTILIZZANDO GLI SCENARI CLIMATICI FUTURI

Nelle tabelle di seguito riportate sono sintetizzati i risultati ottenuti attraverso le simulazioni effettuate, utilizzando quali dati meteorologici in input per il modello EPIC le serie storiche basate sugli scenari futuri.

Nelle tabelle 4.22 e 4.23 sono riportati i risultati relativi ad avena e loglio coltivati nel sito destinato in prevalenza alla realizzazione del pascolo e riferiti al profilo pedologico numero 8.

Per entrambe le colture, la minore produzione di biomassa (crop biomass, CB) è stata osservata con lo scenario denominato "baseline", il quale prevede esclusivamente la proiezione nel futuro del clima attuale, mentre le produzioni più elevate sono state osservate con gli scenari A2 HadCM3 e B2 HadCM3 e rispettivamente per l'avena ed il loglio. L'analisi della varianza condotta tra le medie dei sub-periodi ha mostrato come le produzioni siano aumentate in modo significativo dal sub-periodo 2020 al sub-periodo 2080. Pur in assenza di evidenza statistica è comunque possibile osservare anche come per l'avena la produzione di biomassa si riduca spostandosi dal sub-periodo 2020 al 2050 per poi aumentare nuovamente nel sub-periodo 2080.

Tale andamento è attribuibile alla dinamica della CO₂ dell'atmosfera che permette nel lungo periodo l'incremento della produzione di biomassa. Andamento analogo a quanto osservato per la variabile CB è stato osservato, in entrambe le specie, per la variabile water use efficiency (WUE). I valori più bassi sono stati infatti osservati per lo scenario "baseline" mentre i valori maggiori sono stati osservati negli scenari che simulano il mutamento climatico, i quali non si sono differenziati in modo significativo tra loro. Per l'avena il confronto tra le medie dei sub-periodi ha messo in evidenza un andamento non lineare nei valori relativi alla WUE; infatti il valore più elevato è stato registrato nel sub-periodo 2020, mentre il più basso è stato osservato nel periodo 2050, parzialmente confermando quanto osservato per la CB. Per quanto attiene alla variabile "water stress" (WS) sia l'avena che il loglio hanno fatto registrare un andamento analogo dei valori delle medie per ciascun scenario. In modo particolare, dal confronto tra scenari emerge come il minor numero di giorni di stress sia determinato dallo scenario

"baseline" mentre il maggiore numero di giorni di stress sia stato determinato dallo scenario B2 HadCM3. Per quanto riguarda il confronto tra sub-periodi, si assiste ad un progressivo aumento del numero di giorni di stress idrico con il procedere del tempo, anche se non sono emerse differenze statisticamente significative tra i sub-periodi 2050 e 2080. Anche per la variabile "low temperature stress" (LTS) le due specie hanno mostrato un andamento simile tra loro. Per entrambe le specie, il maggior numero di giorni di stress determinato da bassa temperatura è stato registrato con lo scenario "baseline", mentre i valori inferiori sono stati registrati con gli altri scenari, senza differenze significative fra loro. Il confronto tra sub-periodi ha mostrato come il numero di giorni di stress da basse temperature diminuisca spostandosi dal sub-periodo 2020 al 2080, in accordo con l'aumento delle temperature previsto dagli scenari climatici. Questa affermazione non è però supportata da una evidenza statistica nel caso del loglio, mentre per l'avena differenze significative si hanno tra il sub-periodo 2020 ed i restanti 2 sub-periodi.

Sempre nell'ambito del profilo numero 8, in tabella 4.24 si riportano i risultati delle analisi statistiche condotte sui dati del trifoglio. Per quanto riguarda la variabile "crop biomass", anche in questo caso il valore inferiore si ha in corrispondenza dello scenario "baseline", mentre la più elevata produzione di biomassa si ha in corrispondenza dello scenario A2 HadCM3, caratterizzato dal più marcato aumento delle temperature. Per la stessa variabile i valori medi di produzione di biomassa sono risultati significativamente crescenti passando dal sub-periodo 2020 al 2080. Lo stesso andamento è stato registrato per la variabile CB relativa al pascolo in corrispondenza del profilo numero 8 (tabella 4.25). Relativamente al trifoglio, per la variabile WUE l'analisi della varianza condotta tra i valori medi dei differenti scenari ha messo in evidenza differenze significative tra il valore inferiore osservato per lo scenario "baseline" ed il più elevato, relativo allo scenario A2 HadCM3. Differenze significative sono state messe in evidenza anche tra i sub-periodi, ed in particolare il sub-periodo 2050 ha fatto registrare la minore efficienza nell'utilizzo dell'acqua. Per la variabile WS non sono state osservate differenze significative tra i differenti scenari, mentre queste sono state evidenziate tra i sub-periodi 2020 e 2050 ed il sub-periodo 2080.

Per il LTS il maggior numero di giorni di stress determinato da bassa temperatura è stato osservato relativamente allo scenario "baseline". Questo non ha mostrato differenze significative dallo scenario B2 GISS, caratterizzato dal minore incremento delle temperature, mentre si è differenziato in modo significativo dagli altri scenari utilizzati nella simulazione. Tra sub-periodi è stata osservata la progressiva riduzione del numero di giorni di stress spostandosi verso il sub-periodo 2080.

Per il pascolo il valore più basso relativo alla variabile WUE è stato osservato, anche in questo caso, per lo scenario "baseline" il quale si è differenziato in modo significativo da tutti gli altri scenari. Tra sub-periodi, non sono emerse differenze significative tra il sub-periodo 2020 e 2080 i quali si sono però differenziati dal 2050 che ha fatto registrare il valore minore. Il maggiore stress idrico è stato osservato in corrispondenza dello scenario A2 HadCM3, con differenza significative rispetto al valore più basso relativo allo scenario "baseline". I tre sub-periodi si sono differenziati in modo significativo tra di loro ed il minor numero di giorni di stress si è verificato nel sub-periodo 2050. Per la variabile LTS lo scenario "baseline" ha determinato il maggior numero di giorni di stress da bassa temperatura e tale valore si è differenziato significativamente dal minor numero di giorni di stress registrato con lo scenario A2 HadCM3.

Tabella 4.22 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti all'avena relativamente al profilo numero 8.

AVENA PROFILO N°8

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,98	3,24	3,57	3,40	3,06	3,25 B
2050	2,46	2,99	3,88	2,71	2,92	2,99,B
2080	4,64	4,51	4,82	3,62	3,77	3,87 A
Media scenario	2,69 C	3,58 AB	4,09 A	3,24 BC	3,25 BC	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	23,94	27,62	28,65	28,94	25,44	26,92 A
2050	13,61	17,75	21,69	16,03	17,18	17,25 C
2080	14,73	20,15	28,42	22,66	23,25	23,24 B
Media scenario	17,42 B	24,17 A	26,25 A	22,54 A	21,96 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	55,42	57,22	55,28	55,83	60,95	56,94 B
2050	71,43	82,39	77,88	79,60	82,10	78,68 A
2080	69,52	83,13	86,54	82,68	81,76	80,73 A
Media scenario	65,46 B	74,25 AB	73,24 AB	72,71 AB	74,94 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	37,28	31,20	30,80	31,50	33,93	32,95 A
2050	35,00	23,72	22,48	28,02	25,22	26,89 B
2080	35,37	19,37	17,82	22,20	23,46	23,64 B
Media scenario	35,88 A	24,77 B	23,70 B	27,24 B	27,54 B	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.23 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al loglio relativamente al profilo numero 8.

LOGLIO PROFILO N°8

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	4,99	4,96	5,30	5,20	6,86	5,46 B
2050	5,22	5,56	6,80	5,40	7,63	6,12 B
2080	5,76	8,02	8,30	7,07	8,79	7,59 A
Media scenario	5,32 C	6,18 BC	6,80 AB	5,89 BC	7,76 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	14,34	14,68	14,91	15,20	20,12	15,85 AB
2050	11,20	12,20	13,93	11,99	16,52	13,17 B
2080	12,57	17,31	18,10	15,78	19,31	16,61 A
Media scenario	12,71 B	14,73 B	15,65 AB	14,32B	18,65 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	40,67	39,60	38,78	39,03	46,03	40,82 B
2050	48,06	61,65	59,63	55,44	70,60	59,10 A
2080	47,64	66,63	65,06	60,54	69,17	61,80 A
Media scenario	45,46 C	55,99 AB	54,49 ABC	51,67 BC	61,93 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	27,95	23,06	23,27	23,59	22,83	24,14 A
2050	29,03	20,45	19,73	23,58	19,41	22,44 A
2080	28,92	18,86	15,18	21,23	17,72	20,38 A
Media scenario	28,63 A	20,79 B	19,39 B	22,80 AB	19,99 B	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.24 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al trifoglio relativamente al profilo numero 8. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

TRIFOGLIO PROFILO N°8

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	1,45 a, <i>a</i>	1,52 a, <i>c</i>	1,60 a, <i>c</i>	1,54 a, <i>b</i>	1,55 a, <i>b</i>	1,53 C
2050	1,5 c, <i>a</i>	1,88 ab, <i>b</i>	2,1 a, <i>b</i>	1,71 bc, <i>b</i>	1,84 b, <i>a</i>	1,80 B
2080	1,52 d, <i>a</i>	2,38 b, <i>a</i>	2,66 a, <i>a</i>	2,11 c, <i>a</i>	2,02 c, <i>a</i>	2,14 A
Media scenario	1,49 D	1,93 B	2,12 A	1,79 C	1,80 BC	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	11,74 a, <i>a</i>	13,41 a, <i>b</i>	13,61 a, <i>b</i>	13,61 a, <i>ab</i>	13,29 a, <i>a</i>	13,13 B
2050	8,77 c, <i>a</i>	12,58 ab, <i>b</i>	14,12 a, <i>b</i>	11,07 b, <i>b</i>	11,78 b, <i>a</i>	11,66 C
2080	9,30 d, <i>a</i>	19,05 ab, <i>a</i>	21,01 a, <i>a</i>	16,23 bc, <i>a</i>	14,66 c, <i>a</i>	16,05 A
Media scenario	9,93 D	15,01 AB	16,25 A	13,64 BC	13,24 C	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	8,21	5,99	6,50	5,59	12,14	7,69 B
2050	8,13	8,34	8,19	7,91	8,28	8,17 B
2080	15,37	12,42	14,10	11,51	16,05	13,89 A
Media scenario	10,57 A	8,92 A	9,60 A	8,34 A	12,16 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	49,22	46,10	46,20	46,06	45,30	46,58 A
2050	49,21	42,49	41,73	45,63	42,59	44,33 AB
2080	47,61	37,82	36,37	40,35	39,37	40,30 B
Media scenario	48,68 A	42,13 B	41,43 B	44,01 AB	42,42 B	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.25 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al pascolo relativamente al profilo numero 8. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

PASCOLO PROFILO N°8

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	6,23 a, a	6,42 a, c	7,04 a, c	6,60 a, b	7,07 a, c	6,67 C
2050	6,49 d, a	8,37 bc, b	10,73 a, b	7,25 cd, b	9,51 ab, b	8,47 B
2080	6,77 b, a	13,69 a, a	13,56 a, a	11,42 a, a	12,89 a, a	11,67 A
Media scenario	6,50 D	9,49 B	10,45 A	8,42 C	9,82 AB	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	24,67	28,38	29,74	28,87	30,08	28,35 A
2050	21,71	26,08	26,51	24,65	26,02	24,99 B
2080	23,53	28,09	28,72	28,78	28,35	27,49 A
Media scenario	23,30 B	27,52 A	28,32 A	27,43 A	28,15 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	46,07 a, a	50,18 a, b	47,33 a, b	48,33 a, b	50,32 a, b	48,45 B
2050	32,39 b, b	47,41 a, b	51,10 a, b	42,22 a, b	46,29 a, b	43,88 C
2080	29,78 d, b	72,71 b, a	81,4 a, a	59,52 c, a	61,44 c, a	60,97 A
Media scenario	36,08 D	56,77 AB	59,94 A	50,02 C	52,68 BC	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	75,50 a, a	68,92 b, a	67,87 b, a	68,51 b, a	67,99 b, a	69,76 A
2050	76,60 a, a	61,51 bc, b	54,37 d, b	66,69 b, a	60,36 c, b	63,91 B
2080	76,83 a, a	42,91 c, c	36,86 c, c	54,07 b, b	51,76 b, c	52,48 C
Media scenario	76,30 A	57,78 C	53,03 D	63,09 B	60,04 BC	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati riguardanti il profilo numero 11 relativo anch'esso all'uso suolo pascolo.

Per quanto riguarda l'avena (tabella 4.26) il valore più elevato della variabile CB è stato osservato in corrispondenza dello scenario A2 HadCM3, mentre con l'impiego dello scenario "baseline" è stato ottenuto il valore minore. I valori medi della produzione di biomassa relativi a questi due scenari sono risultati significativamente differenti tra loro e allo stesso tempo si sono differenziati statisticamente dai valori ottenuti con l'impiego degli altri scenari considerati. Tra sub-periodi è stato registrato un significativo aumento della produzione di biomassa solamente in corrispondenza del sub-periodo 2080, probabilmente in relazione all'aumento delle temperature e della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera. Per quanto riguarda la WUE, il valore minore è stato registrato in corrispondenza dello scenario "baseline", mentre il valore maggiore è stato osservato in seguito all'applicazione dello scenario A2 HadCM3. Tra sub-periodi, il 2050 si è differenziato in modo significativo dagli altri sub-periodi considerati, facendo registrare il valore inferiore. Per la variabile WS, non sono state osservate differenze significative tra scenari mentre lo stress idrico è aumentato in modo significativo nei sub-periodi 2050 e 2080 rispetto al 2020. Per la variabile LTS, solamente il valore relativo alla scenario "baseline" si è differenziato significativamente dagli altri facendo registrare il valore minore mentre, tra sub-periodi, il 2020 ha fatto registrare il maggior numero di giorni con stress da basse temperature.

Relativamente al loglio (tabella 4.27) la produzione di biomassa più elevata è stata fatta registrare dallo scenario B2 HadCM3. Il valore produttivo ottenuto si è differenziata statisticamente dal valore più basso, osservato in seguito all'impiego dello scenario "baseline". Inoltre, i tre sub-periodi si sono differenziati in modo significativo tra loro, facendo registrare valori crescenti dal sub-periodo 2020 al 2080. Per quanto riguarda la water use efficiency, il valore maggiore è stato osservato in corrispondenza dello scenario B2 HadCM3, il quale si è differenziato in modo significativo dagli scenari A2 GISS, B2 GISS e "baseline". Anche in questo caso, quest'ultimo scenario ha fatto registrare il valore minore. Tra sub-

periodi la minore water use efficiency è stata osservata in corrispondenza del sub-periodo 2050 che si è differenziato statisticamente anche dagli altri sub-periodi. Per quanto riguarda la variabile WS il valore più basso è stato osservato a seguito dell'impiego dello scenario "baseline", mentre il valore maggiore è stato osservato in corrispondenza dell'impiego dello scenario B2 HadCM3. I valori per i sub-periodi si sono mostrati crescenti dal sub-periodo 2020 al 2080, con differenze significative solamente tra il 2020 e gli altri sub-periodi considerati. Lo stress da basse temperature per il loglio ha fatto registrare i valori minori in corrispondenza dello scenario A2 HadCM3, mentre il numero più elevato di giorni di stress da basse temperature è stato osservato in seguito all'impiego dello scenario "baseline". Tra i sub-periodi considerati, non sono emerse differenze significative, anche se è possibile osservare una certa riduzione del numero di giorni di stress con il passare del tempo. I risultati ottenuti per le variabili WS e LTS risultano in pieno accordo con quanto atteso in seguito al mutamento climatico.

La variabile "crop biomass" ha fatto registrare sia per il trifoglio (tabella 4.28) che per il pascolo (tabella 4.29) risultati simili; i valori minori sono stati osservati con lo scenario "baseline" mentre quelli più elevati sono stati osservati in seguito all'impiego dello scenario A2 HadCM3. Inoltre, passando dal sub-periodo 2020 al 2080 sono stati registrati valori crescenti della biomassa prodotta sia per il loglio che per il pascolo. Le altre variabili considerate hanno mostrato andamenti differenti tra il trifoglio ed il pascolo. Per quanto attiene al WUE riferito al trifoglio, tra scenari il valore maggiore è stato osservato per il A2 HadCM3 mentre ancora una volta lo scenario "baseline" ha fatto registrare il valore minore. Tutti i sub-periodi hanno mostrato differenze significative tra loro, con il valore minore osservato in corrispondenza del sub-periodo 2050. Sempre in riferimento al trifoglio, in questo caso il minor numero di giorni di stress idrico è stato determinato dallo scenario "baseline" mentre non sono state osservate differenze significative tra gli altri scenari a confronto. Tra i sub-periodi a confronto non sono emerse differenze significative. Nessuna differenza significativa è emersa tra scenari e tra sub-periodi per il numero di giorni di stress causato da bassa temperatura.

Il valore minore di WUE per il pascolo è stato osservato in corrispondenza dello

scenario "baseline", mentre nessuna differenza significativa è emersa tra gli altri scenari che hanno determinato valori di WUE superiori. Fra i tre sub-periodi, la minore water use efficiency è stata osservata in corrispondenza del sub-periodo 2050.

Il maggiore stress idrico è stato determinato dallo scenario A2 HadCM3, mentre il "baseline" ha determinato il minor numero di giorni con stress idrico. Anche in questo caso sono emerse differenze significative tra i sub-periodi considerati; in particolare, il maggior valore di WS è stato quello relativo al periodo 2080 mentre il valore minore quello relativo al periodo 2050. Per quanto riguarda lo stress da basse temperature, è stato osservato un andamento concorde con il mutamento climatico previsto. Infatti il minor numero di giorni di stress è stato osservato relativamente allo scenario che prevede il maggior aumento delle temperature (A2 HadCM3) e nel sub-periodo in cui si prevede il raggiungimento delle temperature maggiori (2080). Tra scenari, differenze significative sono state osservate tra A2 HadCM3 e "baseline"; quest'ultimo ha fatto registrare il numero maggiore di giorni di stress da basse temperature, mentre un numero di giorni di stress intermedio è stato osservato in seguito all'applicazione dello scenario B2 GISS.

Tabella 4.26 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti all'avena relativamente al profilo numero 11. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

AVENA PROFILO N°11

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,85 a, <i>a</i>	3,17 a, <i>b</i>	3,49 a, <i>b</i>	3,35 a, <i>ab</i>	3,01 a, <i>a</i>	3,17 B
2050	2,44 b, <i>a</i>	3,24 b, <i>b</i>	4,21 a, <i>b</i>	2,90 b, <i>b</i>	3,02 b, <i>a</i>	3,16 B
2080	2,65 c, <i>a</i>	5,06 a, <i>a</i>	5,44 a, <i>a</i>	3,92 b, <i>a</i>	4,01 b, <i>a</i>	4,22 A
Media scenario	2,65 C	3,82 B	4,38 A	3,39 B	3,35 B	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	23,75	28,17	29,21	29,30	25,86	27,26 A
2050	13,63	19,29	23,72	17,31	17,95	18,38 B
2080	14,81	29,97	31,43	24,23	24,62	25,01 A
Media scenario	17,39 C	25,81 AB	28,12 A	23,62 AB	22,81 B	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	55,73	56,63	54,94	55,46	60,63	56,68 B
2050	69,09	75,80	70,89	75,10	79,49	74,07 A
2080	67,56	76,74	80,87	74,84	76,86	75,37 A
Media scenario	64,13 A	69,72 A	68,90 A	68,47 A	72,33 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	36,61	30,62	30,59	31,07	34,51	32,62 A
2050	34,59	24,97	23,55	29,06	26,20	27,67 B
2080	34,95	21,30	19,57	24,17	24,67	24,93 B
Media scenario	35,38 A	25,63 B	24,57 B	28,10 B	28,46 B	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.27 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al loglio relativamente al profilo numero 11.

LOGLIO PROFILO N°11

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	6,03	6,07	6,53	6,45	8,28	6,67 C
2050	6,21	6,88	8,32	6,72	9,34	7,49 B
2080	6,48	9,02	9,53	8,04	9,73	8,56 A
Media scenario	6,24 C	7,32 B	8,13 AB	7,07 BC	9,12 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	16,85	17,42	17,78	18,36	23,17	18,71 A
2050	12,77	14,47	16,10	14,23	19,00	15,32 B
2080	13,78	19,28	20,54	17,50	20,66	18,35 A
Media scenario	14,47 B	17,06 B	18,14 AB	16,70 B	20,95 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	42,12	41,38	40,01	40,46	45,81	41,96 B
2050	49,43	54,96	51,48	53,29	62,25	54,28 A
2080	46,95	59,22	64,75	58,00	65,28	58,84 A
Media scenario	46,17 B	51,86 AB	52,08 AB	50,58 AB	57,78 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	29,74	25,78	25,68	26,44	27,83	27,09 A
2050	30,23	23,49	22,58	26,88	26,07	25,85 A
2080	29,87	20,13	17,08	23,03	19,60	21,94 A
Media scenario	29,95 A	23,13 AB	21,78 B	25,45 AB	24,50 AB	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.28 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al trifoglio relativamente al profilo numero 11. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

TRIFOGLIO PROFILO N°11

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	1,41 a, <i>a</i>	1,51 a, <i>c</i>	1,60 a, <i>c</i>	1,56 a, <i>b</i>	1,52 a, <i>b</i>	1,52 C
2050	1,49 c, <i>a</i>	1,90 ab, <i>b</i>	2,09 a, <i>b</i>	1,72 bc, <i>b</i>	1,85 ab, <i>a</i>	1,81 B
2080	1,59 d, <i>a</i>	2,40 b, <i>a</i>	2,65 a, <i>a</i>	2,11 c, <i>a</i>	2,09 c, <i>a</i>	2,17 A
Media scenario	1,50 D	1,94 B	2,11 A	1,79 C	1,82 BC	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	10,55 a, <i>a</i>	12,18 a, <i>b</i>	12,30 a, <i>b</i>	12,62 a, <i>ab</i>	11,26 a, <i>a</i>	11,78 B
2050	8,26 c, <i>a</i>	11,44 ab, <i>b</i>	12,61 a, <i>b</i>	10,09 bc, <i>b</i>	10,59 ab, <i>a</i>	10,60 C
2080	8,94 d, <i>a</i>	16,16 ab, <i>a</i>	17,71 a, <i>a</i>	13,85 bc, <i>a</i>	12,89 c, <i>a</i>	13,91 A
Media scenario	9,25 D	13,26 AB	14,20 A	12,19 BC	11,58 C	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,37	0,00	0,00	0,00	3,33	1,14 A
2050	3,20	0,13	0,00	0,11	0,27	0,74 A
2080	2,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59 A
Media scenario	2,84 A	0,04 B	0,00 B	0,03 B	1,20 AB	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	52,03	49,29	49,88	49,21	49,45	49,97 A
2050	51,94	47,14	46,80	49,73	46,85	48,49 A
2080	52,00	46,42	46,16	47,47	47,48	47,91 A
Media scenario	51,99 A	47,62 A	47,61 A	48,80 A	47,93 A	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.29 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al pascolo relativamente al profilo numero 11. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (a), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

PASCOLO PROFILO N°11

VARIABLE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	6,37 a, a	6,54 a, c	7,29 a, c	6,73 a, b	7,25 a, c	6,84 C
2050	6,59 d, a	8,72 bc, b	11,47 a, b	7,41 cd, b	9,94 ab, b	8,83 B
2080	6,84 c, a	14,87 a, a	14,87 a, a	12,34 b, a	13,68 ab, a	12,52 A
Media scenario	6,60 D	10,04 B	11,21 A	8,83 C	10,29 AB	
VARIABLE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	23,99	27,60	29,15	28,18	29,36	27,65 A
2050	20,71	24,88	25,25	23,49	24,78	23,82 C
2080	22,40	26,85	27,45	27,22	26,93	26,17 B
Media scenario	22,37 B	26,44 A	27,28 A	26,30 A	27,02 A	
VARIABLE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	39,25 a, a	43,38 a, b	40,09 a, b	41,94 a, ab	43,2 a, b	41,57 B
2050	26,74 b, b	39,20 a, b	42,15 a, b	35,29 a, b	38,45 a, b	36,37 C
2080	24,50 d, b	61,25 b, a	68,59 a, a	49,79 c, a	51,77 c, a	51,18 A
Media scenario	30,17 D	47,95 AB	50,28 A	42,34 C	44,48 BC	
VARIABLE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	76,38 a, a	69,58 b, a	68,78 b, a	69,21 b, a	68,70 b, a	70,53 A
2050	77,16 a, a	62,16 bc, b	55,33 d, b	67,44 b, a	61,2 cd, b	64,66 B
2080	77,27 a, a	44,70 c, c	38,98 c, c	54,95 b, b	52,23 b, c	53,63 C
Media scenario	76,94 A	58,81 C	54,36 D	63,67 B	60,71 BC	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Nel caso dell'avena e del loglio, per tutte le variabili esaminate, è possibile osservare un andamento simile tra i due profili entro uso suolo, sia per quanto riguarda il confronto tra scenari che quello tra sub-periodi. Tale comportamento è in parte osservabile anche per il trifoglio, per il quale l'andamento tra i due profili non mostra differenze di rilievo per la produzione di biomassa e l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua, mentre alcune differenze si possono osservare per il WS e il LTS, sia relativamente al confronto tra scenari e tra sub-periodi. I risultati attinenti al pascolo si sono mostrati invece costanti tra i due profili relativi all'uso suolo destinato al pascolo naturale nella prevalenza delle annate.

Per quanto riguarda l'uso suolo erbaio, di seguito si riportano le tabelle relative ai profili numero 13 e 15.

In tabella 4.30 sono riportati i risultati relativi all'avena per il profilo 13. Ancora una volta i valori minore di biomassa prodotta, water use efficiency e water stress sono stati ottenuto con l'impiego dallo scenario "baseline", mentre i valori più elevati sono stati determinati dall'impiego dello scenario A2 HadCM3. Per contro, e come atteso, i valori minori di LTS sono stati determinati dallo scenario A2 HadCM3 mentre i valori maggiori hanno corrisposto all'impiego dello scenario "baseline". I risultati derivanti dall'applicazione di questi scenari hanno sempre mostrato differenze significative. Passando all'analisi tra sub-periodi, la produzione più elevata di biomassa è stata registrata nel sub-periodo 2080. Per la variabile WUE tutti i sub-periodi si sono differenziati tra loro ed il valore più basso è stato osservato nel sub-periodo 2050. Il numero di giorni di stress è andato aumentando dal 2020 al 2080 anche se non sono state osservate differenze significative tra gli ultimi due sub-periodi. Proprio l'elevato stress idrico osservabile nel 2050 potrebbe spiegare la riduzione dei valori di CB e WUE osservati nel medesimo periodo, momento in cui l'incremento della concentrazione atmosferica della CO₂ non è ancora in grado di compensare la riduzione di disponibilità idrica. Per quanto riguarda il numero di giorni di stress da basse temperature si è osservata la sua progressiva riduzione nel tempo con differenze significative tra i tre sub-periodi.

Sempre relativamente al profilo numero 13 in tabella 4.31 sono riportati i risultati relativi al loglio. Come per l'avena lo scenario "baseline" ha determinato i valori

più bassi relativi alle variabili CB, WUE e WS ed il valore maggiore di LTS. Tra gli altri scenari considerati, non sono state osservate differenze significative per le variabili CB e WUE mentre differenze sono state registrate per le variabili WS e LTS, con lo scenario B2 HadCM3 che ha determinato inoltre il maggior numero di giorni di stress idrico ed il minor numero di giorni di stress da basse temperature. Tra sub-periodi, l'andamento osservato è analogo a quanto descritto per l'avena. In tabella 4.32 sono riportati i risultati relativi al profilo numero 13 per il trifoglio. Nessuna differenza significativa è emersa tra scenari e tra sub-periodi per quanto riguarda la biomassa prodotta e nessuna differenza è stata messa in evidenza per il valore del WUE relativo ai differenti scenari. Differenze significative sono state osservate invece tra il sub-periodo 2020, che ha fatto registrare il più alto valore di WUE, e gli altri sub-periodi considerati. Per quanto riguarda le variabili WS e LTS, ancora una volta i risultati ottenuti hanno rispecchiato l'atteso, con lo scenario A2 HadCM3 che ha determinato il maggior numero di giorni di stress idrico ed il minor numero di giorni di stress da basse temperature e, viceversa, lo scenario "baseline" che ha determinato l'ottenimento di opposti risultati. Tra sub-periodi il numero di giorni di stress idrico è progressivamente aumentato dal 2020 al 2080 mentre il numero di giorni di stress da basse temperature è progressivamente diminuito. In entrambi i casi tra tutti i sub-periodi le differenze sono risultate significative.

Per quanto riguarda il pascolo (tabella 4.33) ancora una volta i valori minori di CB e WUE sono stati osservati in corrispondenza del "baseline" mentre la maggiore produzione di biomassa è stata determinata dallo scenario A2 HadCM3. Relativamente ai valori di water use efficiency, gli scenari che simulano il mutamento climatico hanno determinato il suo incremento ma non si sono differenziati in maniera significativa tra loro. Tra sub-periodi, ancora una volta la produzione è andata aumentando dal sub-periodo 2020 al 2080 mentre la WUE è diminuita dal 2020 al 2050 per poi nuovamente aumentare nel 2080. Anche in questo caso l'aumento di tale valore nel sub-periodo 2080 è attribuibile all'effetto determinato dall'aumento di concentrazione di CO₂ nell'atmosfera che permette una maggior accumulazione di biomassa da parte delle piante. Per il pascolo e relativamente al profilo 13 nessuna differenza significativa è emersa per il numero

di giorni di stress tra scenari e tra sub-periodi. Nel caso della variabile LTS i risultati hanno confermato quanto osservato per le altre colture e gli altri profili, con il numero di giorni di stress dovuto a basse temperature che diminuisce passando dallo scenario "baseline" a quello A2 HadCM3 e dal sub-periodo 2020 al 2080, in accordo con l'andamento meteorologico previsto in base al mutamento climatico.

Tabella 4.30 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti all'avena relativamente al profilo numero 13.

AVENA PROFILO N°13

VARIABLE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,28	2,34	2,49	2,39	2,36	2,37 B
2050	1,94	2,17	2,52	2,10	2,29	2,20 B
2080	2,07	2,85	3,04	2,39	2,65	2,60 A
Media scenario	2,11 C	2,45 B	2,67 A	2,30 BC	2,43 B	
VARIABLE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	19,11	20,81	20,80	21,07	20,18	20,39 A
2050	11,14	12,92	14,68	12,43	13,85	13,00 C
2080	11,71	17,42	18,93	15,07	15,93	15,81 B
Media scenario	14,38 C	17,34 AB	18,34 A	16,56 B	16,92 AB	
VARIABLE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	30,26	31,18	30,54	30,16	33,91	32,21 B
2050	43,04	49,79	47,42	48,57	51,88	48,14 A
2080	40,52	51,10	55,53	49,16	49,97	49,26 A
Media scenario	37,35 B	43,04 A	43,42 A	41,67 AB	44,38 A	
VARIABLE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	30,27	26,58	25,52	26,43	25,15	26,79 A
2050	25,87	15,95	13,16	20,07	14,76	17,96 B
2080	25,61	10,13	7,65	12,66	10,28	13,27 C
Media scenario	27,48 A	18,25 BC	16,22 C	20,24 B	17,37 BC	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.31 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al loglio relativamente al profilo numero 13.

LOGLIO PROFILO N°13

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,52	2,78	2,85	2,89	3,20	2,85 B
2050	2,32	2,73	3,23	2,58	3,30	2,83 B
2080	2,40	3,68	4,02	3,39	3,27	3,35 A
Media scenario	2,41 B	3,06 A	3,37 A	2,95 A	3,26 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	8,02	9,04	8,89	9,17	10,44	9,11 A
2050	5,59	6,73	7,23	6,43	8,14	6,83 B
2080	5,95	8,89	10,02	8,32	8,16	8,27 A
Media scenario	6,52 B	8,22 A	8,71 A	7,97 A	8,91 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	17,78	18,20	17,55	17,96	25,40	19,38 B
2050	25,61	28,58	29,05	28,75	39,94	30,39 A
2080	23,87	33,43	35,50	32,17	37,09	32,41 A
Media scenario	22,42 C	26,74 B	27,37 B	26,29 B	34,14 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	17,40	14,82	14,09	14,95	11,08	14,47 A
2050	15,53	9,59	8,45	12,21	7,50	10,66 B
2080	15,77	6,93	5,37	8,96	4,49	8,30 C
Media scenario	16,23 A	10,45 BC	9,30 BC	12,04 B	7,69 C	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.32 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al trifoglio relativamente al profilo numero 13. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

TRIFOGLIO PROFILO N°13

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	1,54	1,34	1,56	1,39	1,47	1,46 A
2050	1,33	1,24	1,32	1,29	1,28	1,29 A
2080	1,56	1,15	1,09	1,22	1,52	1,31 A
Media scenario	1,47 A	1,24 A	1,32 A	1,30 A	1,42 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	16,54	16,00	17,53	16,40	16,43	16,58 A
2050	9,14	9,45	10,25	9,53	9,74	9,62 B
2080	10,51	10,70	10,51	10,35	11,78	10,77 B
Media scenario	12,06 A	12,05 A	12,76 A	12,09 A	12,65 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	33,53 a, <i>b</i>	35,86 a, <i>b</i>	34,86 a, <i>c</i>	34,13 a, <i>b</i>	35,94 a, <i>b</i>	34,86 C
2050	49,24 b, <i>a</i>	60,65 a, <i>a</i>	59,44 a, <i>b</i>	57,86 a, <i>a</i>	57,88 a, <i>a</i>	57,02 B
2080	46,54 c, <i>a</i>	66,13 ab, <i>a</i>	73,62 a, <i>a</i>	61,34 b, <i>a</i>	58,25 b, <i>a</i>	61,18 A
Media scenario	43,10 C	54,21 AB	55,97 A	51,11 B	50,69 B	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	39,33 a, <i>a</i>	34,37 a, <i>a</i>	34,39 a, <i>a</i>	34,57 a, <i>a</i>	35,12 a, <i>a</i>	35,56 A
2050	36,13 a, <i>a</i>	25,68 b, <i>b</i>	23,35 b, <i>b</i>	29,34 b, <i>ab</i>	25,7 b, <i>b</i>	28,04 B
2080	37,06 a, <i>a</i>	18,6 bc, <i>c</i>	13,82 c, <i>c</i>	23,32 b, <i>b</i>	22,51 b, <i>b</i>	23,06 C
Media scenario	37,50 A	26,22 BC	23,85 C	29,08 B	27,78 B	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.33 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al pascolo relativamente al profilo numero 13.

PASCOLO PROFILO N°13

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	5,54	5,62	5,83	5,72	5,75	5,69 C
2050	5,72	6,01	6,33	5,83	6,11	6,00 B
2080	5,87	6,98	7,07	6,39	6,62	6,59 A
Media scenario	5,71 C	6,20 AB	6,41 A	5,98 BC	6,16 AB	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	25,82	28,84	30,16	29,87	30,71	29,08 A
2050	18,98	23,41	24,58	21,50	22,55	22,20 B
2080	21,43	30,14	30,21	28,15	27,61	27,51 A
Media scenario	22,07 B	27,46 A	28,32 A	26,50 A	26,96 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	92,05	95,07	94,11	94,00	96,03	94,25 A
2050	84,86	95,14	92,65	92,11	92,30	91,41 A
2080	80,25	95,35	99,72	92,74	90,47	91,71 A
Media scenario	85,72 A	95,19 A	95,49 A	92,95 A	92,93 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	67,51	60,73	57,08	60,14	57,38	60,57 A
2050	61,10	46,03	39,44	51,18	44,36	48,43 B
2080	60,80	33,24	26,87	41,63	38,32	40,17 C
Media scenario	63,14 A	46,67 BC	41,13 C	50,99 B	46,69 BC	

* le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Passando all'analisi del profilo numero 15, anche in questo caso per l'avena (tabella 4.34) la maggiore produzione di biomassa ed il più basso valore di WUE sono stati osservati in corrispondenza dello scenario "baseline", mentre i valori più elevati sono stati registrati a seguito dell'applicazione dello scenario A2 HadCM3. Tra sub-periodi, l'andamento è risultato analogo a quanto descritto per il profilo 13, con la produzione di biomassa che è diminuita a passando dal sub-periodo 2020 al sub-periodo 2050, per poi aumentare, a causa dell'aumento della concentrazione atmosferica di CO₂, nel sub-periodo 2080. Anche la WUE ha seguito tale andamento, con differenze significative tra tutti i sub-periodi considerati. Per la variabile WS, differenze significative sono state osservate tra lo scenario "baseline" (il valore più basso) e lo scenario B2 HadCM3 (il valore più alto). Tra sub-periodi, ancora una volta il numero di giorni di stress è aumentato sino a giungere al valore massimo nel sub-periodo 2080. Relativamente al numero di giorni di stress causati da bassa temperatura, l'andamento osservato è risultato analogo a quanto descritto per l'avena e relativamente al profilo 13.

Anche per il loglio nel profilo 15 la situazione è risultata simile a quanto descritto per per il profilo 13. Infatti anche in questo caso i valori inferiori di CB, WUE e WS sono stati determinati dall'applicazione dello scenario "baseline", mentre lo scenario B2 HadCM3 ha determinato i valori maggiori per il WUE e il WS. Nel caso del CB nessuna differenza significativa è emersa tra gli scenari che simulano il mutamento climatico. Tra sub-periodi la produzione di biomassa è aumentata dal 2020 al 2080, con in primi due sub-periodi che si sono differenziati in modo significativo dal sub-periodo 2080. Per quanto riguarda l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua, l'andamento osservato tra sub-periodi è risultato analogo a quello descritto per l'avena nello stesso profilo. Anche in questo caso è stato infatti possibile osservare l'effetto "fertilizzante" dell'aumento della concentrazione atmosferica della CO₂ nel tempo, con conseguente miglioramento del WUE. Sempre tra sub-periodi il numero di giorni di stress idrico è aumentato progressivamente nel tempo. L'analisi dei valori riferiti alla variabile LTS ha evidenziato come ancora una volta sia lo scenario "baseline" a determinare il maggior numero di giorni di stress causato da basse temperature mentre nel caso

di questa variabile, lo stress minore è stato osservato in seguito all'utilizzo dello scenario B2 HadCM3. Tra sub-periodi il numero di giorni di stress è diminuito nel tempo, con differenze significative tra tutti i periodi.

Per quanto riguarda il trifoglio (tabella 4.36) e relativamente alla quantità di biomassa prodotta, gli scenari considerati non si sono differenziati tra loro in modo significativo, mentre tra sub-periodi è stato osservato un aumento del valore di CB nel tempo, con differenze significative tra i sub-periodi presi in considerazione. Il valore minore per il parametro WUE è stato determinato dallo scenario "baseline" mentre, come registrato in altri profili e per altre colture, lo scenario A2 HadCM3 ha determinato il valore più elevato. Anche nel caso del trifoglio e relativamente al profilo 15, tra sub-periodi è stata osservata la riduzione prima e il successivo aumento della variabile WUE, con differenze significative tra tutti i sub-periodi. Contrariamente a quanto osservato per gli altri profili e per le altre colture, il numero di giorni di stress idrico è risultato maggiore per lo scenario "baseline" mentre il valore minore è stato fatto registrare dallo scenario A2 HadCM3. Tra sub-periodi lo stress maggiore è stato determinato dal sub-periodo 2050. Tale situazione, per certi versi anomala, potrebbe essere giustificata dalla competizione esistente tra il trifoglio, l'avena e loglio che potrebbe determinare il maggiore stress idrico subito in questo caso dalla coltura.

Nel caso della variabile LTS gli andamenti rientrano nella tendenza generale osservata sin ora, con il maggior numero di giorni di stress causati da bassa temperatura determinato dallo scenario "baseline" ed il minore dal l'A2 HadCM3, mentre il valore di LTS ha mostrato una significativa flessione tra i tre sub-periodi considerati.

Nel pascolo, il confronto tra scenari relativo al profilo numero 15 (tabella 4.37) ha mostrato una situazione simile a quanto osservato per il profilo 13. In modo particolare lo scenario "baseline" ha determinato il valore minore per le variabili CB, WUE e WS ed il valore più elevato per LTS. Lo scenario A2 HadCM3 ha fatto registrare per le prime tre variabili i valori più elevati, anche se nel caso di WUE e WS non sono emerse differenze significative con gli altri scenari che simulano il mutamento climatico. Sempre per lo scenario A2 HadCM3 è stato registrato il valore più basso per il numero di giorni di stress determinato da bassa

temperatura. Ancora una volta nel confronto tra sub-periodi è possibile osservare per la variabile CB il costante aumento tra i sub-periodi, mentre per il WUE emerge come l'arricchimento atmosferico di CO₂ determini il miglioramento dell'efficienza nell'utilizzo dell'acqua nel periodo 2080. Anche per il pascolo e relativamente al profilo numero 15 un risultato inatteso è stato ottenuto per lo stress idrico in relazione ai tre sub-periodi. Infatti lo stress maggiore è stato osservato nel sub-periodo 2020 mentre un minore stress è stato osservato nei sub-periodi 2050 e 2080. Per quanto riguarda lo stress determinato da bassa temperatura, ancora una volta il numero di giorni di stress è andato riducendosi, in modo significativo tra i sub-periodi, passando dal 2020 al 2080.

Tabella 4.34 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti all'avena relativamente al profilo numero 15. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (a), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

AVENA PROFILO N°15

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	1,96 a, a	2,09 a, b	2,23 a, b	2,18 a, a	2,15 a, a	2,12 B
2050	1,72 c, a	1,94 bc, b	2,34 a, b	1,83 bc, b	2,11 ab, a	1,99 B
2080	1,78 d, a	2,63 ab, a	2,85 a, a	2,20 c, a	2,42 bc, a	2,38 A
Media scenario	1,82 C	2,22 B	2,47 A	2,07 B	2,23 B	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	17,99 a, a	20,38 a, a	20,23 a, a	20,93 a, a	19,70 a, a	19,85 A
2050	10,56 c, b	12,39 abc, c	14,34 a, b	11,64 bc, c	13,65 ab, b	12,51 C
2080	10,82 c, b	16,82 ab, b	18,46 a, a	14,70 b, b	15,67 b, b	15,30 B
Media scenario	13,12 C	16,53 AB	17,67 A	15,76 B	16,35 AB	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	27,97	28,48	27,08	27,12	33,39	28,81 B
2050	43,03	47,51	44,36	47,61	51,80	46,86 A
2080	41,15	47,88	51,56	46,39	49,09	47,21 A
Media scenario	37,38 B	41,29 AB	41,00 AB	40,37 AB	44,76 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	28,54	23,71	22,57	23,65	21,13	23,92 A
2050	26,52	16,69	13,96	20,82	15,53	18,70 B
2080	26,14	10,64	8,46	13,43	10,81	13,90 C
Media scenario	27,07 A	17,01 BC	14,97 C	19,30 B	15,82 C	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.35 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al loglio relativamente al profilo numero 15.

LOGLIO PROFILO N°15

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	3,15	3,49	3,55	3,64	4,07	3,58 B
2050	3,11	3,60	4,27	3,39	4,49	3,77 B
2080	3,20	4,81	5,22	4,33	4,37	4,39 A
Media scenario	3,15 B	3,97 A	4,34 A	3,79 A	4,31 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	8,91	10,07	9,85	10,34	11,97	10,23 A
2050	6,65	7,92	8,48	7,52	10,00	8,11 B
2080	6,98	10,39	11,76	9,53	9,84	9,70 A
Media scenario	7,51 C	9,46 AB	10,03 AB	9,13 B	10,60 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	16,61	17,25	16,51	16,85	21,83	17,81 B
2050	22,56	27,34	26,02	26,79	36,77	27,90 A
2080	21,13	28,50	31,03	27,39	36,92	28,99 A
Media scenario	20,10 C	24,37 B	24,52 B	23,68 BC	31,84 A	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	20,71	17,75	16,80	17,96	15,48	17,74 A
2050	20,30	14,04	12,52	16,54	11,72	15,03 B
2080	20,42	10,15	8,24	12,51	7,63	11,80 C
Media scenario	20,48 A	13,98 BC	12,52 BC	15,67 B	11,61 C	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.36 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al trifoglio relativamente al profilo numero 15. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

TRIFOGLIO PROFILO N°15

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	2,26	1,95	2,14	2,04	2,36	2,15 C
2050	2,42	2,31	2,45	2,21	2,42	2,37 B
2080	2,66	2,53	2,72	2,41	2,63	2,59 A
Media scenario	2,45 A	2,27 A	2,45 A	2,22 A	2,47 A	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	23,08 a, <i>a</i>	23,04 a, <i>a</i>	23,94 a, <i>a</i>	23,72 a, <i>a</i>	24,62 a, <i>a</i>	23,68 A
2050	15,39 b, <i>b</i>	16,98 ab, <i>b</i>	18,87 a, <i>b</i>	15,56 b, <i>c</i>	17,23 ab, <i>b</i>	16,81 C
2080	16,79 c, <i>b</i>	22,2 ab, <i>a</i>	24,14 a, <i>a</i>	19,98 b, <i>b</i>	19,75 b, <i>b</i>	20,57 B
Media scenario	18,42 C	20,74 B	22,32 A	19,75 BC	20,54 B	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	3,26	2,04	1,89	1,75	2,62	2,31 B
2050	9,16	3,64	3,02	6,34	6,00	5,63 A
2080	8,20	0,17	0,64	3,06	5,41	3,50 B
Media scenario	6,87 A	1,95 BC	1,85 C	3,72 BC	4,68 AB	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	43,74	39,79	39,92	39,60	39,62	40,54 A
2050	42,44	35,26	32,74	37,56	33,91	36,38 B
2080	42,62	30,40	26,87	33,15	31,35	32,88 C
Media scenario	42,93 A	35,15 BC	33,18 C	36,77 B	34,96 BC	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.37 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori riferiti al pascolo relativamente al profilo numero 15. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

PASCOLO PROFILO N°15

VARIABILE: Crop Biomass (t ha ⁻¹)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	5,88 a, <i>a</i>	6,04 a, <i>b</i>	6,27 a, <i>b</i>	6,10 a, <i>b</i>	6,20 a, <i>b</i>	6,10 C
2050	6,20 c, <i>a</i>	6,86 ab, <i>b</i>	7,25 a, <i>b</i>	6,5 bc, <i>b</i>	6,85 ab, <i>b</i>	6,73 B
2080	6,35 c, <i>a</i>	8,76 ab, <i>a</i>	9,26 a, <i>a</i>	7,66 b, <i>a</i>	7,77 b, <i>a</i>	7,96 A
Media scenario	6,14 D	7,22 AB	7,59 A	6,75 C	6,94 BC	
VARIABILE: Water use efficiency (kg S.S. / mm H ₂ O)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	26,70	31,26	33,57	32,22	33,51	31,45 A
2050	21,38	27,92	29,22	25,81	27,37	26,34 B
2080	23,57	34,00	34,45	32,56	32,40	31,40 A
Media scenario	23,88 B	31,06 A	32,41 A	30,19 A	31,09 A	
VARIABILE: Water stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	76,57	78,14	76,71	77,21	79,71	77,67 A
2050	62,24	70,32	68,44	68,64	68,42	67,61 B
2080	59,69	74,93	78,97	69,95	68,27	70,36 B
Media scenario	66,17 B	74,46 A	74,71 A	71,93 AB	72,13 AB	
VARIABILE: Low temperature stress (numero di giorni)						
	Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media sub-periodo
Sub-periodo						
2020	75,35	68,92	67,13	68,48	67,10	69,40 A
2050	75,92	59,54	51,74	64,95	56,33	61,70 B
2080	76,15	40,91	34,89	51,81	47,44	50,24 C
Media scenario	75,81 A	56,46 BC	51,25 C	61,75 B	56,96 BC	

* le medie seguite da lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Anche in questo caso per l'uso suolo erbaio è possibile osservare come per l'avena ed il loglio i risultati ottenuti tra i due profili considerati siano del tutto simili. Questo è valido anche per il trifoglio e per il pascolo ma con alcune eccezioni riguardanti le variabili CB e WUE nel caso del trifoglio e WS e LTS nel caso del pascolo.

Confrontando i risultati ottenuti per le singole colture e per i diversi profili emerge come il mutamento climatico simulato abbia determinato un aumento delle produzioni mentre lo scenario "baseline" ha sempre determinato la minore produzione di biomassa. Allo stesso modo anche l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua è aumentata negli scenari che simulano il mutamento climatico. Tali scenari hanno anche determinato un aumento del numero di giorni di stress idrico determinato dalla prevista diminuzione delle precipitazioni ma allo stesso tempo hanno ridotto anche il numero di giorni di stress causati dalle basse temperature. Proprio quest'ultimo fattore, insieme all'aumento della concentrazione della CO₂ in atmosfera, potrebbe essere il responsabile dell'aumento di produzione di biomassa osservato grazie alla riduzione del numero di giorni in cui si verifica il blocco dello sviluppo delle piante a causa del verificarsi di temperature al di sotto del minimo di vegetazione. Questo spiegherebbe anche il fatto che per tutte le colture ed in tutti i profili sia sempre il sub-periodo 2080, caratterizzato dal maggiore incremento delle temperature massime e minime, a determinare la maggiore produzione di biomassa.

Passando all'analisi della dinamica della sostanza organica organica nel suolo, di seguito si riportano i grafici relativi al trend seguito dai differenti pool considerati dal modello di simulazione per ciascun profilo (figure da 4.16 a 4.27).

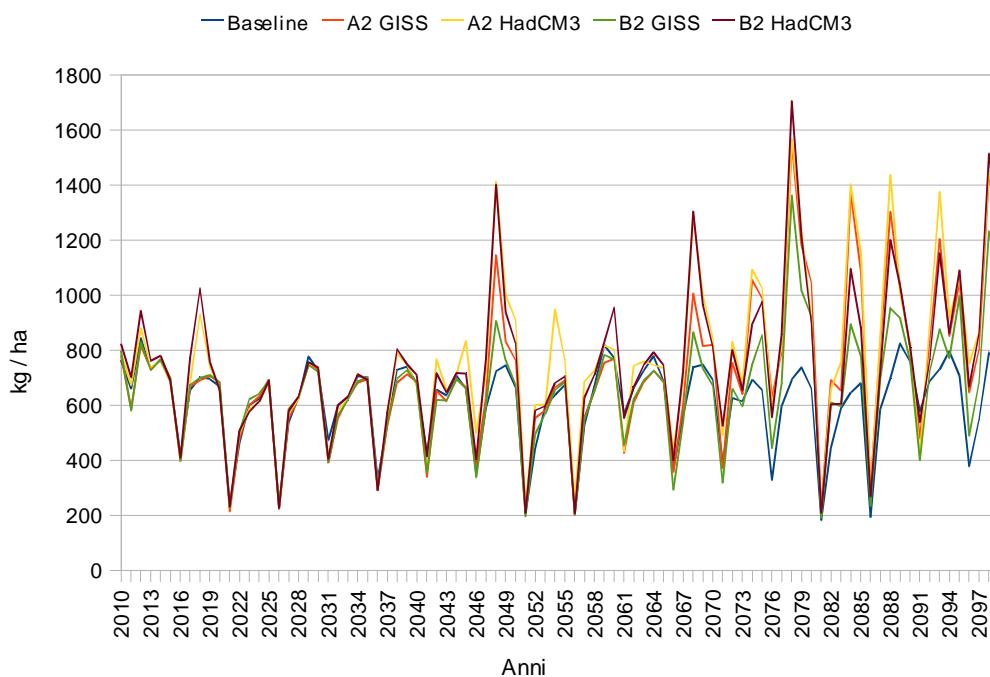


Figura 4.16 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "biomass" per il profilo numero 8.

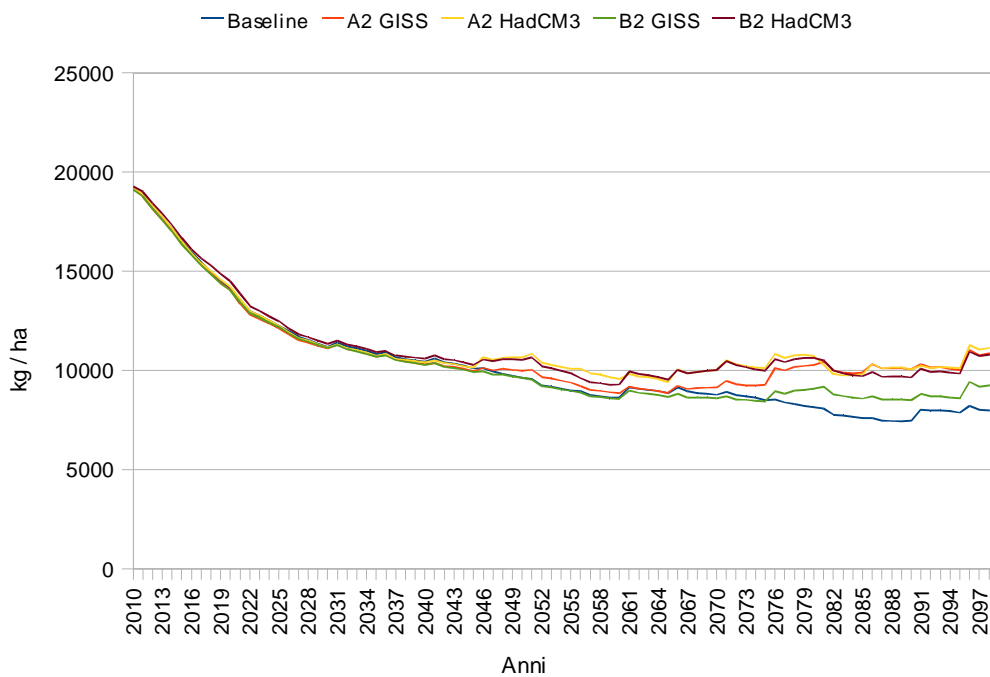


Figura 4.17 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "slow" per il profilo numero 8.

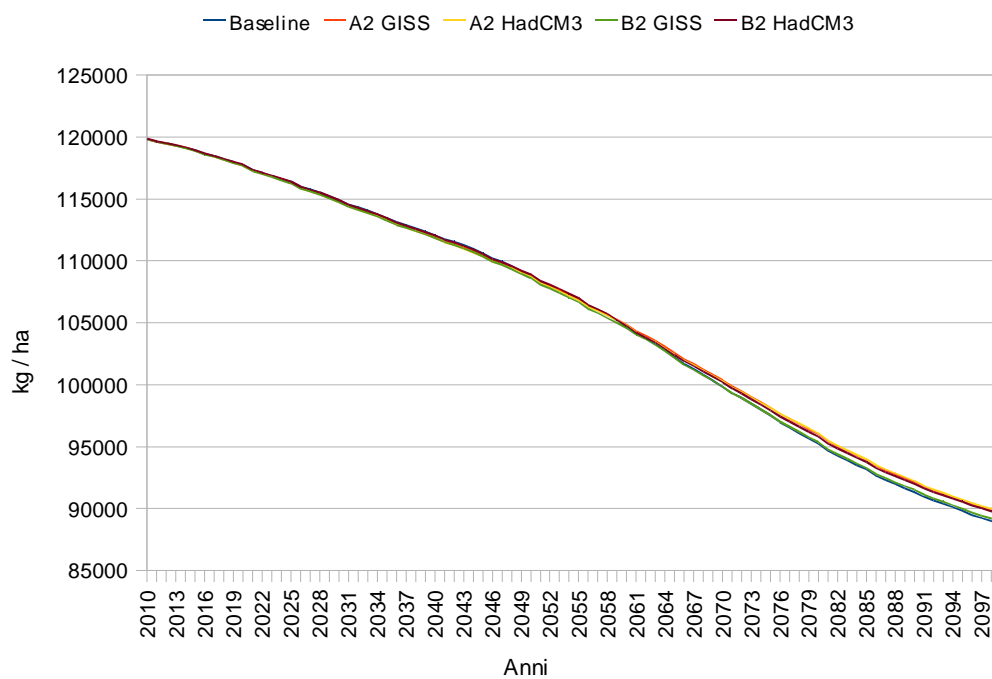


Figura 4.18 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "passive" per il profilo numero 8.

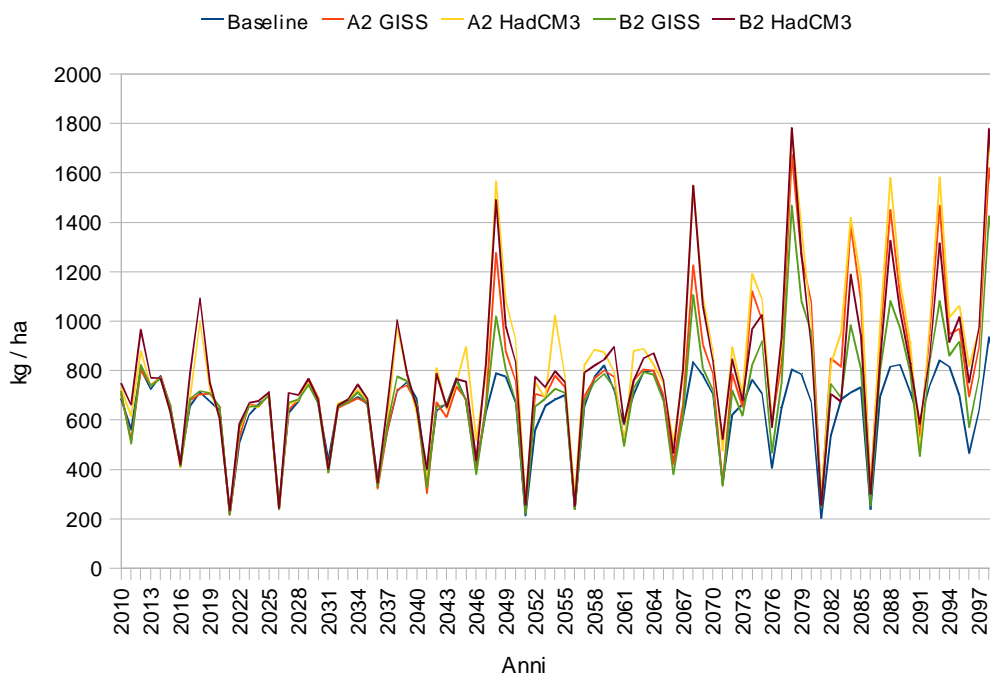


Figura 4.19 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "biomass" per il profilo numero 11.

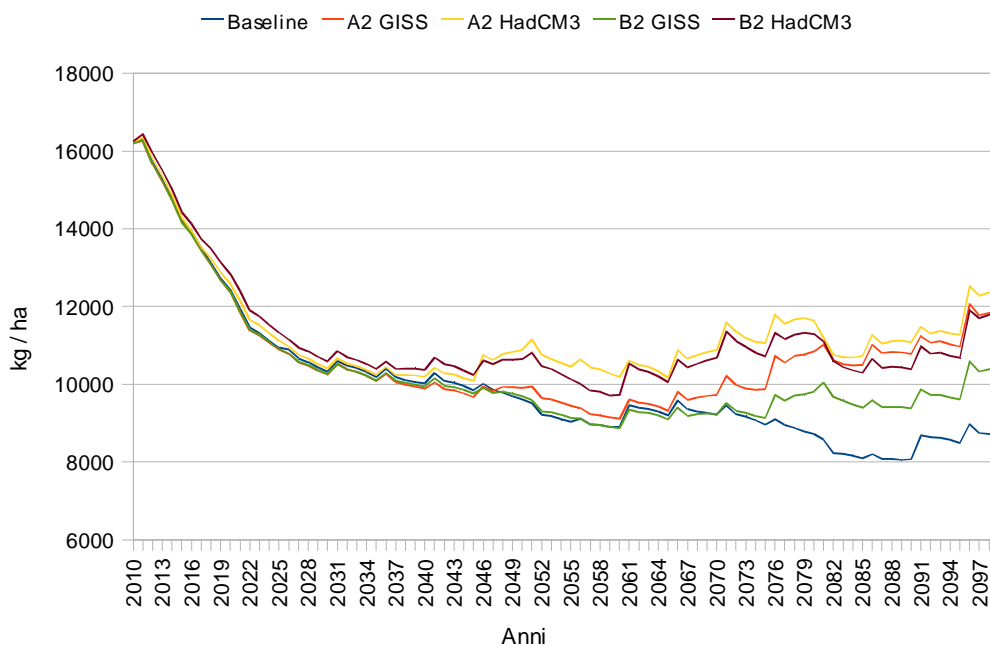


Figura 4.20 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "slow" per il profilo numero 11.

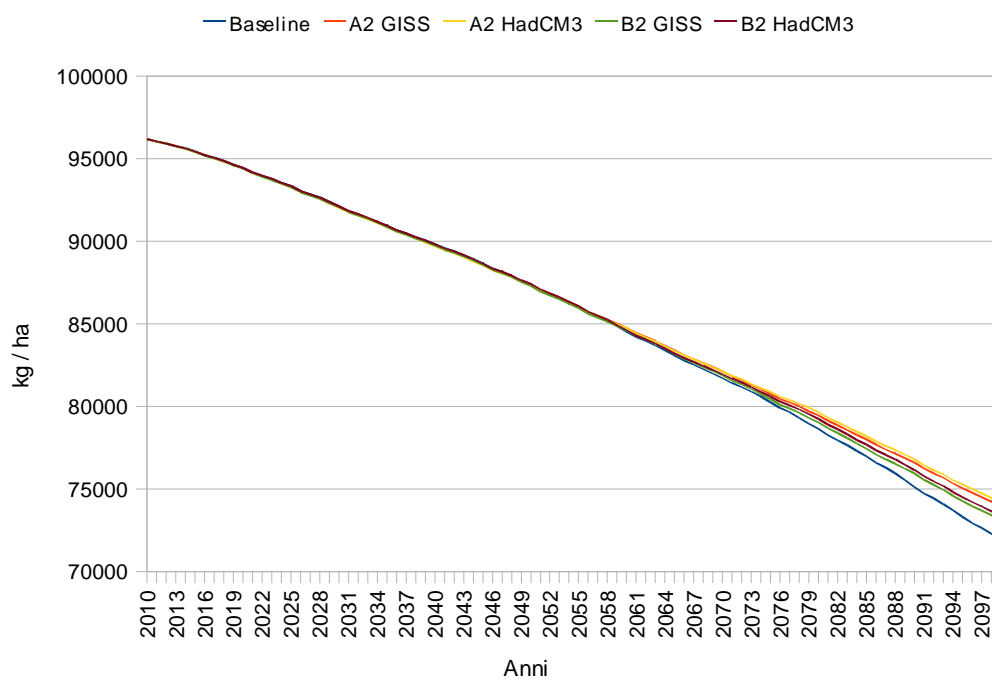


Figura 4.21 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "passive" per il profilo numero 11.

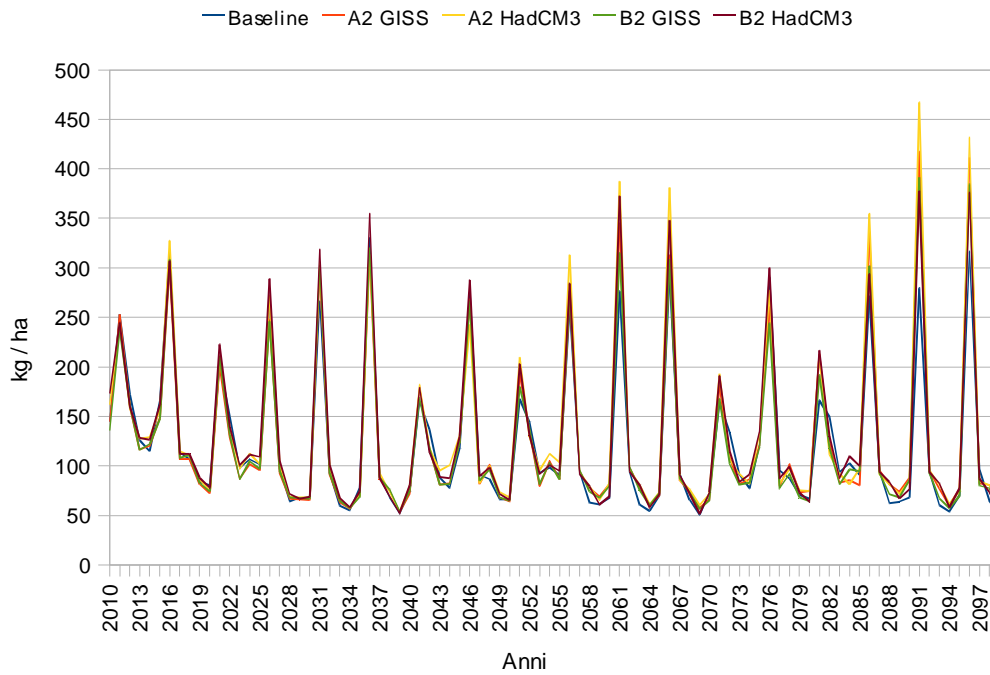


Figura 4.22 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "biomass" per il profilo numero 13.

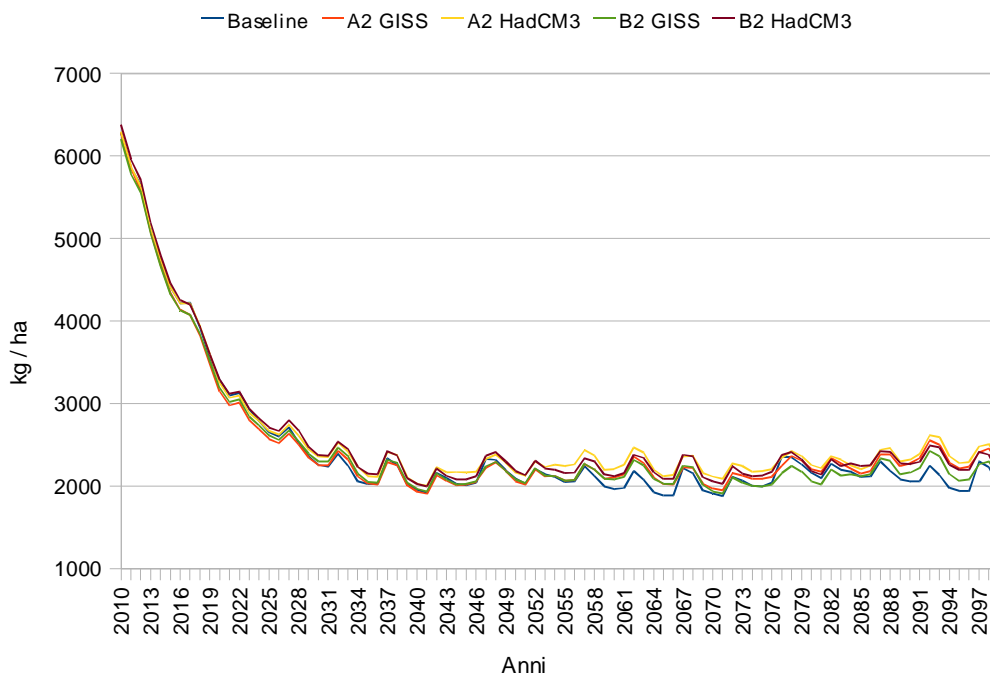


Figura 4.23 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "slow" per il profilo numero 13.

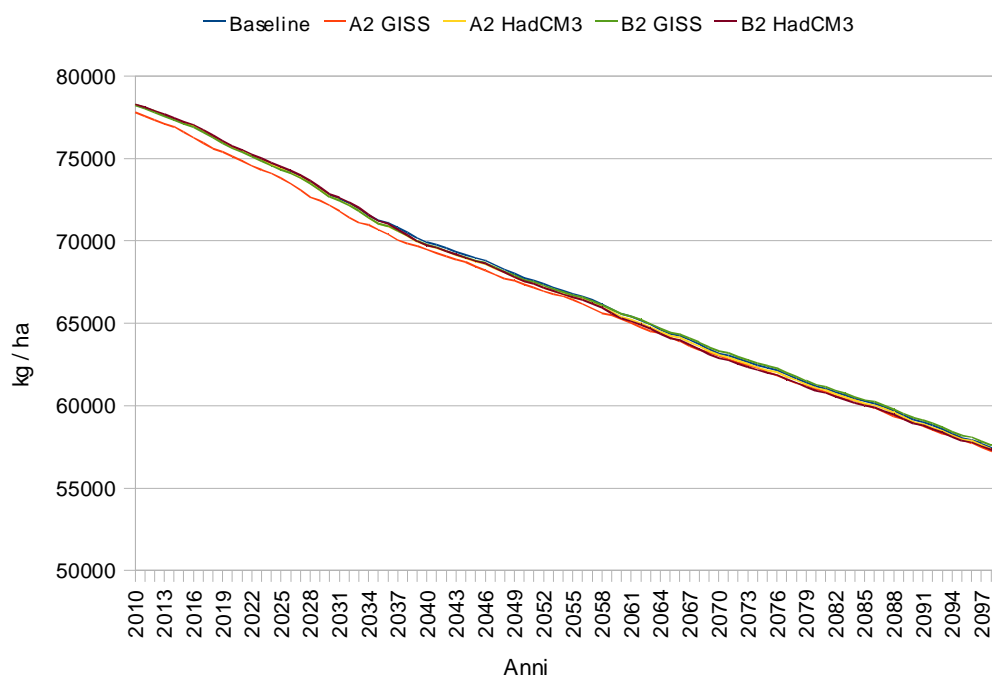


Figura 4.24 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "passive" per il profilo numero 13.

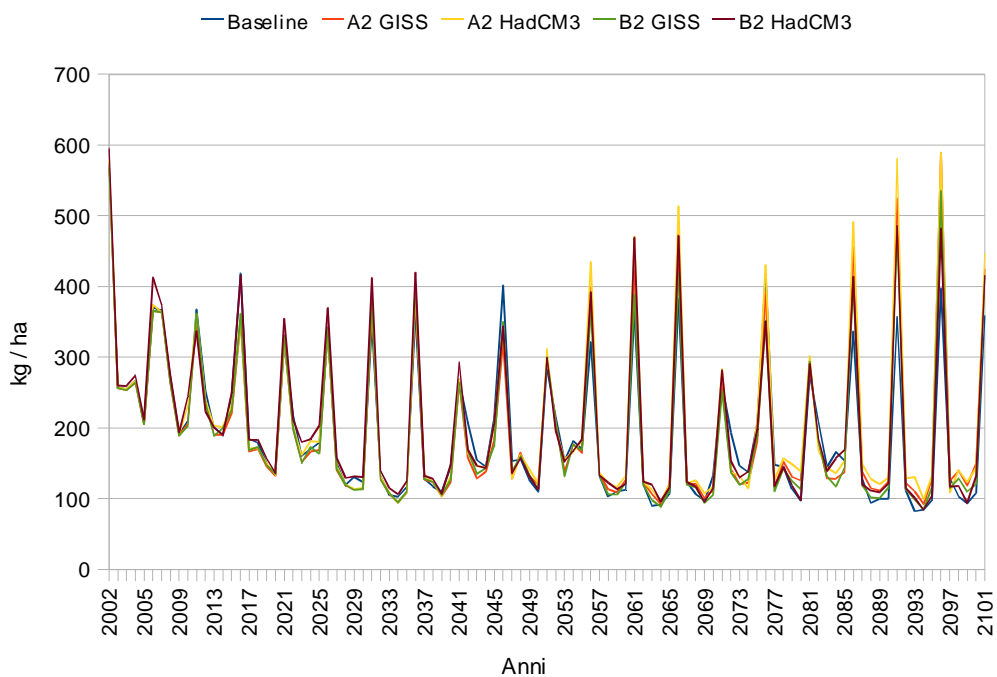


Figura 4.25 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "biomass" per il profilo numero 15.

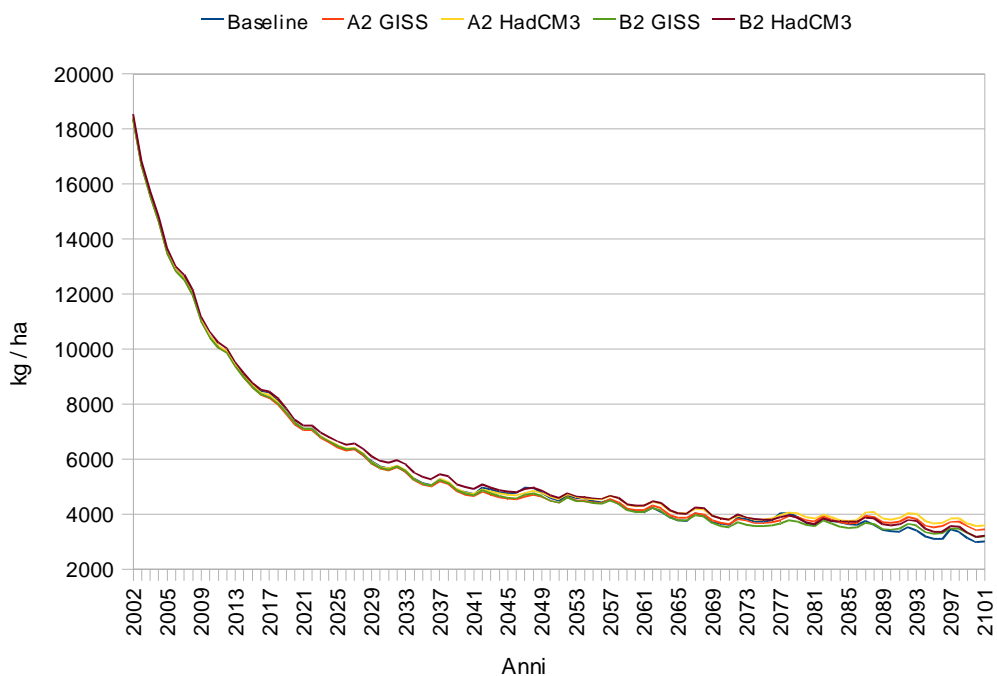


Figura 4.26 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "slow" per il profilo numero 15.

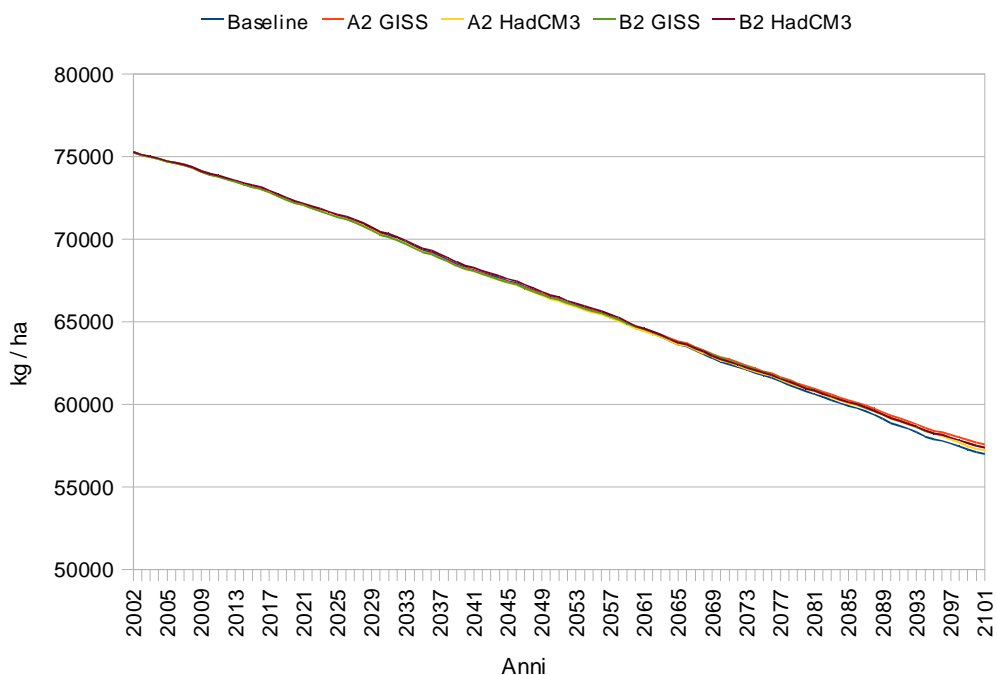


Figura 4.27 - Dinamica del contenuto di carbonio del il pool "passive" per il profilo numero 15.

In tutti i casi è stato confermato il trend decrescente del contenuto di carbonio determinato dalla perturbazione del sistema suolo a causa delle lavorazioni. Come emerge dai grafici riportati, l'effetto degli scenari sul contenuto di carbonio di ciascun pool risulta minimo nei primi 20-30 anni della simulazione, mentre differenze progressivamente crescenti sono osservabili nei restanti anni del periodo considerato. Tali differenze risultano maggiormente evidenti per il contenuto di carbonio dello "slow pool", grazie alla sua velocità di turnover che si attesta nell'ordine di alcune decine di anni. Nel caso del "biomass pool" le differenze sono comunque visibili ma vengono notevolmente mascherate dall'effetto dalle lavorazioni sulla degradazione della sostanza organica. Nel caso del pool "passive" caratterizzato da un turnover che si attesta intorno ai 100 anni, le differenze indotte dai differenti scenari climatici sono visibili, in alcuni casi, solamente negli ultimi anni della simulazione.

È interessante notare come, nella maggioranza dei casi, il maggior contenuto di carbonio corrisponda agli scenari caratterizzati dal più alto incremento delle temperature. Inoltre, relativamente al pool "slow" è possibile osservare come la

diminuzione del contenuto di C nel suolo avvenga con minore rapidità negli scenari che simulano i maggiori incrementi delle temperature e come il contenuto di carbonio si attesti attorno ad un livello maggiore rispetto a quanto riportato per lo scenario "baseline" e per gli scenari che prevedono il minore incremento della temperatura.

In tabella 4.38 sono riportate, per il sub-periodo 2020, le medie ed i risultati dell'analisi della varianza condotta per i tre pool della sostanza organica.

Nessuna differenza statisticamente significativa è stata posta in evidenza fra i 5 scenari a confronto per tutti i pool considerati, mentre differenze statisticamente significative sono state osservate fra pascolo ed erbaio. In particolare, nell'uso suolo pascolo, tutti i pool hanno mostrato in media valori marcatamente più elevati. Per quanto riguarda lo slow pool, caratterizzato da una dinamica intermedia rispetto agli altri due, differenze statisticamente significative sono state osservate anche fra i due profili studiati sull'uso suolo pascolo, mentre relativamente al passive pool, caratterizzato da una dinamica estremamente lenta, differenze statisticamente significative sono state osservate fra tutti i profili a confronto.

Passando ai dati riferiti al sub-periodo 2050, riportati in tabella 4.39, solo per il passive pool non sono state evidenziate differenze statisticamente significative fra scenari a confronto. I dati relativi al "biomass pool", caratterizzato da una dinamica estremamente veloce, indicano nello scenario A2 HadCM3 quello che determina i livelli più elevati di carbonio nel suolo, mentre nessuna differenza statisticamente significativa è stata posta in evidenza fra gli altri 4 scenari a confronto. Nell'ambito dello "slow pool", è sempre lo scenario A2 HadCM3 quello che ha determinato i valori più elevati di C nel suolo, seguito secondo un ordine decrescente dagli scenari B2 HadCM3, A2 GISS, "baseline" e B2 GISS.

Nel sub-periodo 2050, i risultati relativi al confronto fra usi suolo e fra profili hanno confermato quanto osservato per il sub-periodo 2020.

Passando all'ultimo sub-periodo considerato, per il passive pool si conferma l'assenza di differenze fra scenari osservata anche per gli altri due sub-periodi considerati, mentre su una scala temporale più ampia, si osserva l'aumento della variabilità del "biomass pool" gli fra scenari a confronto. In particolare, A2

HadCM3 si conferma come lo scenario che determina i valori più elevati di carbonio, mentre i valori più bassi sono stati determinati dallo scenario "baseline". Relativamente allo slow pool i valori maggiori sono stati determinati dallo scenario A2 HadCM3 seguito in ordine decrescente da A2 GISS, B2 HadCM3, B2 GISS e "baseline". Ancora una volta i risultati relativi al confronto fra uso suolo e fra profili hanno confermato quanto osservato precedentemente.

In tabella 4.41 sono riportate le medie ed i risultati dell'analisi della varianza condotta per i tre pool della sostanza organica per l'intero intervallo 2010-2099. Relativamente allo "slow pool", non sono state osservate differenze statisticamente significative tra i differenti scenari a confronto. In riferimento al "biomass pool" i valori maggiori di carbonio sono stati registrati attraverso l'impiego dello scenario A2 HadCM3 e seguito, in ordine decrescente, dagli scenari B2 HadCM3, A2 GISS, B2 GISS e "baseline". Passando allo "slow pool" sempre lo scenario A2 HadCM3 ha determinato i valori più elevati, mentre il "baseline", che non prevede alcun aumento delle temperature e della concentrazione atmosferica della CO₂, ha fatto registrare i valori più bassi. Anche dall'esame dell'intero periodo 2010-2099 emergono differenze statisticamente significative tra uso del suolo e differenze significative fra i profili entro uso suolo solo relativamente ai pool di carbonio caratterizzati dalla minore velocità di degradazione della sostanza organica nel suolo.

Tabella 4.38 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori del contenuto di carbonio osservati per i 4 profili e per i 5 scenari nei tre pool in relazione al sub-periodo 2020. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

SUB-PERIODO 2020

		VARIABILE: C content "biomass pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	521,35	508,87	530,47	515,56	545,93	524,44 A
	11	501,66	500,10	530,25	506,32	506,32	508,93 A
Erbaio	13	123,26	117,87	125,33	119,82	128,47	122,95 B
	15	123,52	119,28	124,89	121,60	132,08	124,31 B
Media scenario		317,45 A	311,53 A	327,74 A	315,86 A	328,20 A	

		VARIABILE: C content "slow pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	6879,67	6712,33	6870,73	6769,03	6999,10	6846,20 A
	11	6171,76	6098,73	6289,53	6119,60	6119,60	6159,80 B
Erbaio	13	2810,53	2757,63	2861,03	2783,83	2890,20	2820,60 C
	15	2773,33	2722,33	2807,13	2757,23	2909,83	2794,00 C
Media scenario		4658,80 A	4572,80 A	4707,10 A	4607,40 A	4729,70 A	

		VARIABILE: C content "passive pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	81748,30	81650,10	81650,17	81628,60	81741,80	81683,80 A
	11	54935,90	54901,30	54910,00	54883,03	54883,03	54902,70 C
Erbaio	13	63229,07	63134,20	63168,17	63124,23	63257,13	63182,60 B
	15	45695,20	45624,17	45656,00	45613,37	45758,97	45669,50 D
Media scenario		61402,10 A	61327,4 A	61346,10 A	61312,30 A	61410,20 A	

* Le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.39 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori del contenuto di carbonio osservati per i 4 profili e per i 5 scenari nei tre pool in relazione al sub-periodo 2050. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (a), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

SUB-PERIODO 2050

		VARIABILE: C content "biomass pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	537,50	558,40	644,24	533,94	630,76	580,97 A
	11	539,66	583,62	674,80	554,40	554,40	581,37 A
Erbaio	13	109,67	114,81	122,45	113,08	119,20	115,84 B
	15	116,03	11,03	127,37	115,64	125,43	120,31 B
Media scenario		325,2 B	343,46 B	392,21 A	329,2 B	357,44 AB	
		VARIABILE: C content "slow pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	5826,60 c, a	5801,63 cd, b	6487,4 a, b	5656,00 d, b	6312,67 b, a	6018,86 B
	11	5884,17 b, a	5992,73 b, a	6854,53 a, a	5852,57 b, a	5825,57 b, b	6076,51 A
Erbaio	13	2014,23 b, c	2047,83 b, d	2169,87 a, d	2051,53 b, d	2135,3 a, d	2253,26 C
	15	2192,13 b, b	2194,1 b, c	2346,8 a, c	2187,23 b, c	2355,03 a, c	2083,75 D
Media scenario		3979,28 CD	4009,08 C	4464,65 A	3930,33 D	4157,14 B	
		VARIABILE: C content "passive pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	73155,97	73152,87	73092,60	72958,23	73192,80	73110,50 A
	11	50486,97	50505,10	50569,47	50430,80	50430,80	50484,60 C
Erbaio	13	56595,33	56531,43	56392,10	56474,80	56331,97	56465,10 B
	15	40828,27	40824,00	40756,83	40803,40	40912,90	40825,20 D
Media scenario		55266,60 A	55253,50 A	55202,80 A	55166,80 4	5521,10 A	

* Le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.40 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori del contenuto di carbonio osservati per i 4 profili e per i 5 scenari nei tre pool in relazione al sub-periodo 2080. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (*a*), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

SUB-PERIODO 2080

		VARIABILE: C content "biomass pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	554,82 c, <i>a</i>	804,66 ab, <i>a</i>	837,43 a, <i>a</i>	669,37 bc, <i>a</i>	787,24 ab, <i>a</i>	730,70 A
	11	563,24 c, <i>a</i>	825,43 ab, <i>a</i>	877,47 a, <i>a</i>	693,88 bc, <i>a</i>	693,88 bc, <i>a</i>	730,78 A
Erbaio	13	112,97 a, <i>b</i>	123,25 a, <i>b</i>	127,23 a, <i>b</i>	116,39 a, <i>b</i>	123,28 a, <i>b</i>	127,34 B
	15	118,52 a, <i>b</i>	131,81 a, <i>b</i>	136,69 a, <i>b</i>	121,81 a, <i>b</i>	127,86 a, <i>b</i>	120,62 B
Media scenario		337,39 D	471,29 AB	494,71 A	400,37 C	433,06 BC	
		VARIABILE: C content "slow pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	6024,70 d, <i>b</i>	7669,83 b, <i>b</i>	8057,93 a, <i>b</i>	6638,33 c, <i>b</i>	7803,83 ab, <i>a</i>	7238,93 B
	11	6186,57 d, <i>a</i>	8113,97 b, <i>a</i>	8634,63 a, <i>a</i>	7095,70 c, <i>a</i>	7095,70 c, <i>b</i>	7425,31 A
Erbaio	13	2070,17 b, <i>d</i>	2193,63 a, <i>c</i>	2259,67 a, <i>d</i>	2090,23 b, <i>c</i>	2210,40 a, <i>d</i>	2164,82 D
	15	2254,07 c, <i>c</i>	2436,13 b, <i>c</i>	2555,00 a, <i>c</i>	2262,87 c, <i>c</i>	2416,47 b, <i>c</i>	2384,91 C
Media scenario		4133,88 E	5103,39 B	5376,81 A	4521,78 D	4881,60 C	
		VARIABILE: C content "passive pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	61297,50	61882,47	61921,10	61329,70	61761,33	61638,4 A
	11	45331,73	45956,17	46213,70	45605,40	45605,40	4542,50 C
Erbaio	13	51127,37	51129,27	50867,03	51077,63	50796,73	50999,60 B
	15	36079,43	36332,87	36182,13	36239,67	36242,33	36215,30 D
Media scenario		48459,00 A	48825,20 A	4896,00 A	48563,10 A	48601,50 A	

* le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

Tabella 4.41 - Medie e risultati dell'analisi della varianza condotta sui valori del contenuto di carbonio osservati per i 4 profili e per i 5 scenari nei tre pool in relazione al periodo 2010 - 2009. Le lettere maiuscole (A) sono riferite al risultato dell'analisi della varianza condotta sugli effetti principali delle variabili, mentre con le lettere minuscole, rispettivamente con carattere normale (a) o italico (a), sono indicate le MDS delle interazioni rispettivamente tra scenari entro periodo e tra periodi entro scenari.

PERIODO 2010 – 2009

		VARIABILE: C content "biomass pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	537,89 c, a	623,97 ab, a	670,71 a, a	572,96 bc, a	654,64 a, a	612,04 A
	11	534,85 c, a	636,38 ab, a	694,17 a, a	584,86 bc, a	584,86 bc, b	607,03 A
Erbaio	13	115,3 a, b	118,64 a, b	125,00 a, b	116,43 a, b	123,65 a, c	119,80 B
	15	119,37 a, b	122,71 a, b	129,65 a, b	119,73 a, b	128,46 a, c	123,98 B
Media scenario		326,85 C	375,43 B	404,88 A	348,50 BC	372,90 B	

		VARIABILE: C content "slow pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	6243,66 c, a	6727,93 b, a	7138,69 a, a	6357,79 c, a	7038,53 ab, a	6701,32 A
	11	6080,83 c, a	6735,14 b, a	7259,57 a, a	6346,96 c, a	6346,96 c, b	6553,89 B
Erbaio	13	2298,31 a, b	2333,03 a, b	2430,19 a, b	2308,53 a, b	2411,97 a, c	2356,41 D
	15	2406,52 b, b	2450,86 ab, b	2569,64 a, b	2399,44 b, b	2560,44 a, c	2477,38 C
Media scenario		4257,33 C	4561,74 B	4849,52 A	4353,18 B	4589,48 B	

		VARIABILE: C content "passive pool" (kg ha ⁻¹)					
		Baseline	A2 GISS	A2 HadCM3	B2 GISS	B2 HadCM3	Media profilo
Uso suolo	N° profilo						
Pascolo	8	7206,26	72228,48	72221,29	71972,18	72231,98	72144,20 A
	11	50251,53	50454,19	50564,39	50306,41	50306,41	50376,60 C
Erbaio	13	56983,92	56931,63	56809,10	56892,22	56795,28	56882,40 B
	15	4086,63	40927,24	40864,99	40885,48	40971,40	40903,30 D
Media scenario		55042,60 A	55135,40 A	55114,90 A	55014,10 A	55076,30 A	

* le medie seguite dal lettere diverse differiscono per $P \leq 0,05$

5. CONCLUSIONI

Il lavoro ha riguardato due delle tipologie di uso del suolo identificate nell'area studio del bacino Berchidda – Monti, in cui il pascolo e l'erbaio rappresentano circa il 50% della superficie. In relazione al progetto nazionale "Cambiamenti Climatici e Sistemi Produttivi Agricoli e Forestali: Impatto sulle Riserve di Carbonio e sulla Diversità Microbica del Suolo, SOILSINK", finanziato dal Fondo Interministeriale per lo Sviluppo della Ricerca (FISR), tale lavoro deve considerarsi come il primo passo verso lo studio dell'influenza dei sistemi colturali con differente grado di intensivizzazione sulla dinamica della sostanza organica del suolo e come il previsto mutamento climatico possa influire sui sistemi colturali presi in esame.

I risultati delle simulazioni condotte per lo studio dell'effetto del mutamento climatico sulle produzioni dei sistemi colturali in esame hanno mostrato come il previsto mutamento climatico porti ad un aumento del quantitativo di biomassa prodotta dalle colture studiate

Tale risultato è stato confermato, in linea generale, sia dai risultati riferiti ai differenti scenari climatici che da quelli relativi ai tre differenti sub-periodi presi in considerazione per gli anni compresi tra il 2010 ed il 2099. Le maggiori produzioni sono state determinate da quegli scenari che simulano un più marcato incremento delle temperature e sempre con riferimento al sub-periodo 2080, sub-periodo in cui è previsto, nell'ambito dell'arco di tempo considerato, il raggiungimento delle temperature più elevate. Si può pertanto supporre che il fattore maggiormente limitante la produzione di biomassa nelle colture considerate siano le basse temperature e non una ridotta disponibilità idrica. Tale supposizione è avvalorata dal fatto che i risultati scaturiti dalle simulazioni che prevedevano il mantenimento delle attuali condizioni climatiche, hanno sempre fatto registrare i maggiori valori di stress da basse temperature.

Inoltre, i risultati ottenuti mostrano come il mutamento climatico vada ad influenzare anche lo stress idrico subito dalle colture ed infatti, nella maggioranza dei casi è stato osservato come gli scenari che simulano la maggiore riduzione delle precipitazioni abbiano causato i più alti livelli di stress idrico per le colture

in esame. L'aumento di tale stress non ha però avuto ripercussioni negative evidenti sulla produzione di biomassa, probabilmente a causa dell'effetto della contemporanea riduzione dello stress determinato dalle basse temperature. Si deve inoltre considerare che gli scenari climatici futuri che simulano il mutamento climatico, prevedono l'aumento della concentrazione atmosferica della CO₂ determinando quindi un effetto positivo sulla produzione di biomassa. L'effetto fertilizzante dell'aumento di concentrazione della CO₂ potrebbe quindi concorrere, insieme all'aumento delle temperature, all'ottenimento delle maggiori produzioni osservate nel sub-periodo 2080 quando, sempre nell'ambito dell'arco temporale considerato per le simulazioni, la concentrazione di CO₂ raggiunge i livelli più elevati.

Tali conclusioni sono da ritenersi valide esclusivamente per le colture con ciclo di coltivazione autunno-vernino e per le quali la raccolta avviene nei mesi primaverili. Tali colture, infatti, sfuggono ai possibili effetti negativi determinati dall'aumento delle temperature oltre i valori soglia e risentono in modo limitato dell'incremento del già elevato stress idrico indotto dalle scarse precipitazioni della stagione primaverile-estiva.

Dai risultati delle simulazioni effettuate sono emerse marcate differenze fra gli usi suolo "pascolo" ed "erbaio" in termini di contenuto di carbonio del suolo, in relazione alle diversa frequenza di lavorazione per la coltivazione di foraggiere annuali. Nei pool caratterizzati dalla minore velocità di degradazione della sostanza organica, sono state evidenziate delle differenze anche fra i profili individuati entro l'uso suolo. Tali risultati hanno confermato come le basse velocità di degradazione della sostanza organica, caratteristiche dei pool slow e passive, abbiano determinato il mantenimento nel tempo delle differenze puntuali del contenuto di carbonio, mentre queste differenze a carattere puntuale fra i profili entro uso suolo abbiano mostrato una significativa attenuazione solo nel caso del pool con il più rapido turnover.

In entrambi gli usi suolo studiati il trend del contenuto di carbonio nei tre pool previsti dal modello di simulazione è risultato decrescente a causa dell'effetto delle lavorazioni effettuate per la messa a coltura del terreno. Tale decremento è

risultato più rapido nell'uso suolo "erbaio", caratterizzato da una maggiore frequenza delle lavorazioni, rispetto a quanto osservato per l'uso suolo "pascolo". Inoltre l'uso suolo pascolo si è distinto per il maggior contenuto di carbonio rispetto all'uso suolo erbaio relativamente ai pool biomass e slow che, per via della loro dinamica, risultano maggiormente influenzati dalle lavorazioni del terreno.

Sempre in relazione alla dinamica della sostanza organica, in linea generale non è stata evidenziata una interazione tra i diversi scenari e gli usi del suolo considerati. Fra scenari è stato invece osservato come il mutamento climatico simulato abbia determinato un più lento decremento del contenuto di carbonio nel suolo, a causa dell'aumento della produzione di biomassa da porre a sua volta in relazione all'influenza esercitata dalla più elevata concentrazione atmosferica della CO₂ e dalle temperature più elevate. Il più lento decremento del contenuto di carbonio può essere messo quindi in relazione con il maggior quantitativo di biomassa prodotta dalle colture che, al termine del loro ciclo colturale o vegetativo, viene incorporata nel terreno ed è in grado di compensare la maggiore velocità di mineralizzazione della sostanza organica determinata dall'aumento delle temperature.

Lo studio condotto ha permesso di comprendere sia l'influenza dell'uso del suolo sulla dinamica della sostanza organica e sia l'influenza del previsto mutamento climatico e riscaldamento globale sullo sviluppo delle colture.

Nei prossimi anni si prevede di proseguire lo studio con l'obiettivo di una ulteriore validazione del modello di simulazione in riferimento anche ad ulteriori annate. Ulteriore obiettivo futuro dello studio avviato è rappresentato dalla possibilità di estendere i risultati delle simulazioni effettuate, e basate sulla calibrazione del modello su micro-aree, ad una scala spaziale di bacino attraverso l'approccio geostatistico.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo mio percorso sono numerose le persone che voglio ringraziare per il sostegno, la disponibilità o "solamente" perché hanno avuto la pazienza di starmi vicino durante i momenti più stressanti.

Un ringraziamento particolare va al sig. Giovanni Casu, proprietario dei terreni sui quali è stata condotta l'intera attività di ricerca. Senza la sua disponibilità non sarebbe stato possibile portare a termine il lavoro. Ringrazio anche il dott. Casu ed il sig. Sircana che hanno dato piena disponibilità per la conduzione di numerosi campionamenti nei loro vigneti ed il sig. Gianni che, grazie alla sua grande esperienza, ha sempre fornito preziose informazioni.

Un grandissimo ringraziamento va al dott. Luigi Ledda che nel corso di questi tre anni ha sempre creduto in me. Grazie mille per tutti i preziosi consigli e per essere sempre stato disponibile alla discussione quando si doveva risolvere un problema.

Voglio ringraziare tutto lo staff del Blackland Research and Extension Center di Temple (TX) ed in modo particolare la dott.ssa Evelyn Steglich per la sua estrema disponibilità ed il dott. Jimmy Williams per aver messo a mia disposizione la sua grande conoscenza del modello di simulazione EPIC.

Grazie ai compagni di corso / avventura in Texas, specialmente alla dott. Rosa Francaviglia e alla dott.ssa Roberta Farina che hanno dimostrato una grande disponibilità e con le quali ho affrontato e risolto alcuni dei problemi incontrati.

Grazie di cuore ai colleghi e amici di lunga data Mauro Salis e Simona Muroi, sempre disponibili a dispensare preziosi consigli e a fare quattro risate insieme nei momenti più bui. Grazie anche ai "nuovi arrivati" Paola Deligios, Roberta Farci, Roberto Lai, Annapaola Chergia. Ringrazio anche la collega Maria Carmela Caria con la quale ho avuto il piacere di collaborare durante il lavoro svolto in questi tre anni. Un grazie particolare va inoltre alla dott.ssa Emma Rapposelli simpaticissima e sempre disponibile quando mi sono rivolto a lei per avere qualche consiglio.

Grazie ai compagni di questa avventura, i colleghi del XXI ciclo, con i quali ho condiviso gli alti ed i bassi di questi tre anni di corso.

Desidero inoltre ringraziare Nunzia Tramontana. Una persona veramente

stupenda, dalla disponibilità infinita e che si è sempre dimostrata amica nei miei confronti. Grazie per tutte le volte che mi hai "ricordato" di mangiare.

Uno speciale ringraziamento va a Massimo Gattulli, anzi al dott. Massimo Gattulli, grande amico da tanti anni che non mi ha mai "abbandonato". Gli dico solo: «grazie mille Massi, ci rifaremo del tempo perso».

Un grande ringraziamento va ai miei genitori, a mio fratello Roberto e a mia sorella Claudia che mi hanno sempre sostenuto e hanno ascoltato i miei sfoghi nei momenti difficili. Grazie.

Un posto speciale lo dedico a Giulia con la quale ho condiviso momenti belli e brutti del corso di dottorato e con la quale ora condivido tutta la mia vita. Grazie per l'aiuto, i consigli e per essermi stata sempre vicina. Sono fortunato ad averti incontrato.

BIBLIOGRAFIA

- Abruna F., Rodriquez J., Silva S., 1982. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico. VI Grain sorghum. J. Agric. Univ. P.R. 61: 28-38.
- Adams W.A., 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. J. Soil Sci. 24: 10–17.
- Albrecht A., Kandji S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 99: 15-27.
- Alcamo J., Endejan M., Kirilenko A.P., Golubev G.N., Dronin N.M., 2005. Climate Change and its Impact on Agricultural Production in Russia. In: Understanding Land-Use and Land-Cover Change in Global and Regional Context, E. Milanova, Y. Himiyama, and I. Bicik Eds., Science Publishers, Plymouth, Devon, 35-46.
- Alcamo J., Moreno J.M., Nováky B., Bindi M., Corobov R., Devoy R.J.N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesen J.E., Shvidenko A., 2007. Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541-580.
- Alexandrov V., Eitzinger J., Cajic V., Oberforster M., 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. Glob. Change Biol., 8: 372-389.
- Allmaras R.R., Schomberg H.H., Douglas Jr. C.L., Dao T.H., 2000. Soil organic carbon sequestration potential of adopting conservation tillage in U.S. croplands. J. Soil Water Conserv. 55: 365–373.
- Alvarez R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage. Soil Use and Management, 21: 38-52.
- Angers D.A., Carter M.R., 1996. Aggregation and soil organic matter storage in cool, humid, agricultural soils. In: Carter M.R., Stewart B.A. (Eds.), "Structure and organic matter storage in soils", CRC Press, Boca Raton, FL: 193-211.
- Audsley E., Pearn K.R., Simota C., Cojocaru G., Koutsidou E., Rounsevell M.D.A., Trnka M., Alexandrov V., 2006. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? Environ. Sci. Pol., 9: 148-162.
- Backer C.K., Gallagher J.N., Monteith J.L., 1980. Daylength change and leaf appearance in winter wheat. Plant, Cell Environ. 3: 285-287.
- Balasin D., 1990. Zootecnica speciale. Ed. Edagricole, Bologna.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M., 2000. Relationship of soil organic matter

- dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53: 215– 230.
- 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.
- Beare M.H., Hendrix P.F., Coleman D.C., 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 777-786.
- Ben Mohamed A., Duivenbooden N.V., Abdoussallam S., 2002. Impact of climate change on agricultural production in the Sahel. Part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change*, 54, 327-348.
- 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.
- Bindi, M., Moriondo M., 2005. Impact of a 2 °C global temperature rise on the Mediterranean region: Agriculture analysis assessment. *Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global temperature rise*, Giannakopoulos C., Bindi M., Moriondo M., Tin T., Eds., WWF, 54–66.
- Bonciarelli F., 1995. *Fondamenti di agronomia generale*. Ed. Edagricole.
- 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.
- Brenes E., Pearson R.W., 1973. Root responses of three Gramineae species to soil acidity in an Oxisols and an Ultisols. *Soil Sci.* 116:295-302.
- Brown R.A., Rosenberg N.J., 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 83 (I 997) 171-203.
- Cambardella C.A., Elliott E.T., 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 56: 777-783.
- 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.
- Cannell M.G.R., 2003: Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK.

- Biomass & Bioenergy, 24: 97-116.
- Cannell M.G.R., Palutikof J.P., Sparks T.H., 1999. Indicators of Climate Change in the UK. DETR, London, 87 pp.
- 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.
- Ceccon P, Borin M, 1995. Elementi di Agrometeorologia e Agroclimatologia. Ed. Imprimerie.
- Cole G.W., Lyles L., Hagen L.J., 1982. A simulation model of daily wind erosion soil loss. 1982 ASAE Winter Meeting, Paper No. 82-2575.
- 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.
- Coleman K., Jenkinson D.S., 1996. RothC-26.3 - a model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets. NATO ASI Series I, vol. 38. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.
- Conant R.T., Paustian K., Elliott E.T., 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11: 343-355.
- 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.
- Costantini E.A.C, Bocci M., L'Abate G., Fais A., Leone G., Loj G., Magini S., Napoli R., Nino P., Urbano F., 2004. Mapping the state and risk of desertification in Italy by means of remote sensing, soil GIS and the EPIC model. methodology validation in the Sardinia island, Italy. International

- Symposium: Evaluation and Monitoring of Desertification. Synthetic Activities for the Contribution to UNCCD, Tsukuba, Ibaraki, Japan, February 2 2004, NIES publication.
- Daget Ph., Poissonet T., 1969 - Analyse phytologique des prairies. INRA, Montpellier Document, 48: 1-66.
- Donatelli M., 1995. Sistemi nella gestione integrata delle colture - Appunti delle lezioni. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA - Sezione di Modena, Modena, 133 pag.
- Doorenbos J. e Kassam A.H., 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33. Food. Agric. Org. United Nations, Rome.
- 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.
- Eavis B.W., 1972. Soil physical condition affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and, moisture availability as influenced by bulk density moisture levels in a sandy loam soil. Plant Soil 36: 613-622.
- Enquete Commission, 1992. Climate Change: a threat to global environment. Economica Verlag, Bonn, Germany, 235 p.
- EEA, 2005. Vulnerability and adaptation to climate change in Europe. EEA Technical report, No 7/2005. ISSN 1725-2237
- Eswaran H., Van Den Berg E., Reich R., 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 192-194.
- Ewert F., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Metzger M.J., Leemans R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. Agr. Ecosyst. Environ., 107, 101-116.
- Falloon P., Smith P., Powlson D.S., 2004. Carbon sequestration in arable land - the case for field margins. Soil Use and Management, 20: 240-247.
- FAO, 1992. Current world fertilizer situation and outlook. FAO, Rome, Italy.
- FAO, 1996. Production Year Book. FAO, Rome, Italy.
- Feng, S., Hu Q., 2004. Changes in agro-meteorological indicators in the contiguous United States: 1951-2000. Theor. Appl. Climatol., 78: 247-264.
- Fila G., Bellocchi M., Acutis M., Donatelli M., 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. Europ. J. Agronomy, 18: 369-372.
- 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.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W.,

- Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Foy C.D., Lafever H.N., Scwartz J.W., Fleming A.L., 1974. Aluminum tolerance of wheat cultivars related to region of origin. *Agron. J.* 66: 751-758.
- Franko U., Oelschlägel B., Schenk S., 1995. Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. *Ecol. Model.* 81: 213–222.
- Freibauer A., Rounsevell M., Smith P., Verhagen A., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122: 1-23.
- Gauch H.G., Hwang J.T.G., Fick G.W., 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Argon. J.* 95, 1442–1446.
- Gehu J.-M., Rivas-Martinez S., 1981. Notions fondamentales de phytosociologie. *Ber. Int. Simp. Int. Vereinigung Vegetationsk.* 5-33.
- Genovese, G., Lazar C., Micale F., 2005. Effects of observed climate fluctuation on wheat flowering as simulated by the European crop growth monitoring system (CGMS). *Proceedings of a Workshop on Adaptation of Crops and Cropping Systems to Climate Change, 7-8 November 2005, Dalum Landbrugsskole, Odense, Denmark. Nordic Association of Agricultural Scientists*, 12 pp.
- Gerik T.J., Harman W.L., Williams J.R., Francis L., Greiner J., Magre M., Meinardus A., Steglich E., 2006. *Researcher's guide for WinEPIC, Verison 3.0.* Texas A&M Blackland Research Center. BRC Report No. 05-01. Temple, Texas.
- Giannakopoulos C., Bindi M., Moriondo M., LeSager P., Tin T., 2005. *Climate Change Impacts in the Mediterranean Resulting from a 2°C Global Temperature Rise.* WWF report, Gland Switzerland.
- Giardini L., 2002. *Agronomia generale, ambientale e aziendale.* Ed. Patron.
- Gijsman A.J., Hoogenboom G., Parton W.J., Kerridge P.C., 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agron. J.* 94: 462–474.
- Gleixner G., Poirier N., Bol R., Balesdent J., 2002. Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Org. Geochem.* 33: 357– 366.
- Goklany I.M., 2005. *Acclimate policy for the short and medium term: stabilization or adaptation?* *Energ. Environ.*, 16: 667-680.
- 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.
- Greuter W., Burdet H. M., Long G., 1984-89. Med-Checklist, voll.I-IV. Genève, Suisse.
- Gordon C.; Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood, R.A., 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16: 147-168.
- Hafner S., 2003. Trends in maize, rice and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: a prevalence of linear growth. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 97: 275-283.
- Hanks R.J., 1983. Yield and water use relationships: an overview. Pp 393-411. In Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.) *Limitation to efficient water use in crop production*, CSSA and SSSA, Madison, Wis.
- Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E., Svendsen H., 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer Res.* 27: 245–259.
- Hansen J., Ruedy R., Lacis A., Sato Mki., Nazarenko L., Tausnev N., Tegen I., Koch D., 2000. Climate modeling in the global warming debate. In *General Circulation Model Development* (D. Randall, Ed.), pp. 127-164. Academic Press. San Diego.
- Hansen J. E., Sato Mki., Nazarenko L., Ruedy R., Lacis A., Tegen I., Hall T., Shindell D., Stone P., Novakov T., Thomason L., Wang R., Wang Y., Jacob D.J., Hollandsworth-Frith S., Bishop L., Logan J., Thompson A., Stolarski R., Lean J., Willson R., Levitus S., Antonov J., Rayner N., Parker D., Christy J., 2002. Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations. *J. Geophys. Res.* 107, 4347, DOI 10.1029/2001JD001143.
- Hildén M., Lehtonen H., Bärlund I., Hakala K., Kaukoranta T., Tattari S., 2005. *The Practice and Process of Adaptation in Finnish Agriculture*. FINADAPT Working Paper 5, Finnish Environment Institute Mimeographs 335, Helsinki, 28 pp.
- 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
- Houghton J.T., Ding D.J., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Xiaosu D. (Eds.), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, p. 892.
- Hudson B.D., 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Cons.*, 49: 189-194.
- IPCC, 1996. *Climate change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution

of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report.

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.

Izaurrealde R.C., Williams J.R., McGill W.B., Rosenberg N.J., Quiroga Jakas M.C., 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling* 192 (2006) 362–384

Izaurrealde R.C., Williams J.R., McGill W.B., Rosenberg N.J., Quiroga Jakas M.C., 2007. Long-term modeling of soil C erosion and sequestration at the small watershed scale. *Climatic Change* (2007) 80:73–90.

Jenkinson D.S., 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Series B* 329: 361–368.

Jenkinson D.S., Coleman K., 1994. Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon. *Eur. J. Soil Sci.* 45: 167–174.

Jansen E., Overpeck J., Briffa K.R., Duplessy J.-C., Joos F., Masson-Delmotte V., Olago D., Otto-Bliesner B., Peltier W.R., Rahmstorf S., Ramesh R., Raynaud D., Rind D., Solomina O., Villalba R., Zhang D., 2007. Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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.

Jones C.A., Cole C.V., Sharpley A.N., Williams J.R., 1984. A simplified soil and plant phosphorus model, I. documentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(4): 800-805.

Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijssman A.J., Ritchie J.T.; 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235-263.

Kaiser K., Eusterhues K., Rumpel C., Guggenberger G., Kögel-Knabner I., 2002. Stabilization of organic matter by soil minerals—investigations of density and particle-size fractions from two acid forest soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 165: 451–459.

Keelin C.D., Bacastow R.B., Carter A.F., Piper S.C., Whoef T.P., Heiman M.,

- Mook W.G., Roeloffzen H. 1989. A three-dimensional model for atmospheric CO₂ transport based on observed winds: I. Analysis of observation data. In Peterson D.H., (Eds.) "Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas". Geophysical Monograph 55, American Geographic Union, Washington, D.C.:165-236.
- Klein R.J.T., Huq S., Denton F., Downing T.E., Richels R.G., Robinson J.B., Toth F.L., 2007. Inter-relationships between adaptation and mitigation. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 745-777.
- 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., Follett R.F., Kimble J.M., Cole C.V., 1999. Managing U.S. cropland to for sequester carbon in soil. J. Soil Water Conserv. 54: 374-381.
- Lal R., 2003: Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. Critical Reviews in Plant Sciences, 22: 151-184.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 304: 1623-1627.
- Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Cole C.V., 1999. The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. CRC Press LLC.
- Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T., 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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 Fhodic 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.

- Maracchi G., Sirotenko O., Bindi M., 2004. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change*, 70 (1), 117–135.
- Maracchi G., Sirotenko O., Bindi M., 2005. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change*, 70, 117-135.
- 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.
- McGill W.B., Hunt H.W., Woodmansee R.G., Reuss J.O., 1981. PHOENIX: a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils. In: Clark F.E. Rosswall T. (Eds.), *Terrestrial Nitrogen Cycles: Processes, Ecosystem, Strategy and Management Impacts*, *Ecol. Bull. (Stockholm)*, vol. 33, pp. 49–115.
- McGill W.B., 1996. Review and classification of ten soil organic matter (SOM) models. In: D.S. Powlson, P. Smith and J.U. Smith (ed.) *Evaluation of soil organic matter models*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp 111–132.
- Menzel A., Jakobi G., Ahas R., Scheifinger H., Estrella N., 2003. Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Climatol.*, 23: 793-812.
- Metzger M.J., Rounsevell M.D.A., Acosta-Michlik L., Leemans R., Schröter D., 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 114: 69–85.
- Mínguez M.I., Ruiz-Ramos M., Díaz-Ambrona C.H., Quemada M., Sau F., 2007. First-order impacts on winter and summer crops assessed with various high resolution climate models in the Iberian Peninsula. *Climatic Change*, 81: S343-S355.
- Molina J.A.E., Cheng H.H., Nicolardot B., Chaussod R., Houot S., 1994. Biologically active soil organics: a case of double identity. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek and B.A. Stewart (Eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publication Number 35. SSSA/ASA, Madison. pp 169–177.
- Molina J.A.E. e Smith P.; 1998. Modelling carbon and nitrogen processes in soil. *Advances in Agronomy* 62: 253-298.
- Monsi M., Saeki T., 1953. Uber den Lictfaktor in den pflanzengesellschaften und sein bedeutung fur die stoffproduktion. *Japan J. Bot.* 14:22-52.
- Monteith N.H. e Banath C.L., 1965. The effects of soil strength on sugarcane growth. *Trop. Agric.* 42: 293-296.
- Moonen A.C., Ercoli L., Mariotti M., Masoni A., 2002. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agr. Forest Meteorol.*, 111: 13-27.

- Mugwira L.M., Patel S.J., Fleming A.L., 1980. Aluminum effects on growth and Al, Ca, Mg, K, and P levels in triticale, wheat, and rye. *Plant Soil* 57: 467-470.
- NEH (National Engineering Handbook), Part 630 Hydrology, 2007. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. United States Department of Agriculture.
- Nicks A.D., 1974. Stochastic generation of the occurrence, patterns and location of maximum amount of daily rainfall. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Aug.-Sept. 1971, Tucson, AZ. U.S. Dep. Agric., Misc. Publ. No. 1275. pp 154-171.
- Ogle S.M., Breidt F.J., Eve M.D., Paustian K., 2003. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic storage for US agricultural lands between 1982 and 1997. *Global Change Biology*, 9: 1521-1542.
- 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
- Olesen J.E., Bindi M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.*, 16: 239-262.
- Olesen J.E., Carter T.R., Díaz-Ambrona C.H., Fronzek S., Heidmann T., Hickler T., Holt T., Mínguez M.I., Morales P., Palutikof J., Quemada M., Ruiz-Ramos M., Rubæk G., Sau F., Smith B., Sykes M., 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change*, 81: S123-S143.
- Onstad C.A., Foster G.R., 1975. Erosion modeling on a watershed. *Trans. ASAE* 18(2): 288-292.
- OSTP, 1997. *Climate Change: State of the Knowledge*. Office of Science Technology Policy, Washington, D.C., 18 pp.
- Parry M., Ed., 2000. *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom, 320 pp.
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S.; 1986. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1173–1179.
- Parton W.J., Scurlock J.M.O., Ojima D.S., Gilmanov T.G., Scholes R.J., Schimel D.S., Kirchner T., Menaut J.-C., Seastedt T., Garcia Moya E., Kamnalrut A., Kinyamario J.I., 1993. Observations and modelling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochem. Cycles* 7: 785–809.

- Parton W.J., Ojima D.S., Cole C.V., Schimel D.S., 1994. A general model for soil organic matter dynamics: Sensitivity to litter chemistry, texture and management. In: *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*, SSSA Spec. Public No. 39, Madison, WI, pp. 147–167.
- Pavan M.A., Bringham F.T., Pratt P.F. 1982. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4/2\text{H}_2\text{O}$. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1201-1207.
- Peng S.B., Huang J.L., Sheehy J.E., Laza R.C., Visperas R.M., Zhong X.H., Centeno G.S., Khush G.S., Cassman K.G., 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 101: 9971-9975.
- Perton W.J., Schmil D.S., Cole C.V., Ojima D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grassland. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1173-1177-
- Pignatti S., 1982. *Flora d'Italia. Voll. I-III. Edagricole, Bologna.*
- Post W.M., Peng T-H, Emanuel W.R., King A.W., De Angelis D.L., 1982. The global carbon cycle. *Am. Sci.* 78: 310-326.
- 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.
- 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.
- Richardson C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resour. Res.* 17(1) pp 182-190.
- Richardson C.W., Wright D.A., 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. U.S. Dep. Agric., Agric. Res. Ser., ARS-8. Pag 83.
- Richter G., Semenov M., 2005. Re-Assessing Drought Risks for UK Crops using UKCIP02 Climate Change Scenarios. Final report of Defra Project CC0368. Retrieved 03.10.2006 from www2.defra.gov.uk/science/project_data/DocumentLibrary/CC0368/CC0368_

- Rivas-Martínez, 1976. Sinfitosociologia, una nueva metodología para el estudio del paisaje vegetal. *Ann. Inst. Bot. Cavillanes*, 33:179-188.
- 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 S. & Rivas y Sáenz S., 2007 - <http://www.globalbioclimatics.org/>
- Ritchie J.T., 1972. A model for prediction evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8: 1204-1213.
- Robeson S.M., 2002. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change*, 52: 219-238.
- Rodhe H., 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science* 248: 1217-1219.
- Rosenzweig C., Casassa G., Karoly D.J., Imeson A., Liu C., Menzel A., Rawlins S., Root T.L., Seguin B., Tryjanowski P., 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., (Eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131.
- Santos F.D., Forbes K., Moita R., Eds., 2002. *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. SIAM project report, Gradiva, Lisbon, 456 pp.
- 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.
- 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.
- Schimel D.S., 1986. Carbon and N turnover in adjacent grassland and cropland ecosystems. *Biogeochemistry* 2: 345-357.
- Schneider U.A., McCarl B.A., 2003. Economic potential of biomass based fuels for greenhouse gas emission mitigation. *Environmental and Resource Economics*, 24: 291-312.
- Seligman N.G., van Keulen H., 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. pp 192-221. In M.J. Frissel

- and J.A. van Veen eds., *Simulation of Nitrogen behavior of Soil-Plant Systems*, Proc. Workshop, Wageningen, gen.- feb. 1980.
- Selvaraju R., 2003. Impact of El Niño-Southern Oscillation on Indian foodgrain production. *Int. J. Climatol.*, 23, 187-206.
- Sequi P., 1989. Sostanza organica e ciclo del carbonio. In: *Chimica del suolo*, Ed. Patron, 1989.
- Severini M., Gilioli G., 2002. Storia e filosofia dei modelli di simulazione nella difesa delle colture. Atti delle II Giornate di Studio su "Metodi Numerici, Statistici e Informatici nella Difesa delle Colture Agrarie e delle Foreste: Ricerca e Applicazioni" - Pisa, Scuola Superiore Sant'Anna, Maggio 2002.
- Shibata M., 1994. Methane production in ruminants. In Minami K., Mosier A., Sass R. (Eds.) " CH_4 and N_2O : global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources". NIAES, Tsukuba, Japan: 105-115.
- Semenov S.M., Yasukevich V.V., Gel'ver E.S., 2006. Identification of Climatogenic Changes. Publishing Center, Meteorology and Hydrology, Moscow, 325 pp.
- Six J., Guggenberger G., Paustian K., Haumaier L., Elliott E.T., Zech W., 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 607– 618.
- Smith P., 2004a. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20: 229-236.
- Smith P., 2004b. Engineered biological sinks on land. In *The Global Carbon Cycle. Integrating humans, climate, and the natural world*, C.B. Field and M.R. Raupach (eds.). SCOPE 62, Island Press, Washington D.C., pp. 479-491.
- Smith P., Milne R., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P., Coleman K., 2000. Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land. *Soil Use Manage.* 16: 293–295.
- Smith J.U., Smith P., Monaghan R., MacDonald A.J.; 2002. When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? *European Journal of Soil Science* 53: 405-416.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., 2007. Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stokle C.O., Donatelli M., Nelson R.; 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.
- Stuczynski T., Demidowicz G., Deputat T., Gorski T., Krasowicz S., Kus J., 2000.

- Adaptation scenarios of agriculture in Poland to future climate changes. *Environ. Monit. Assess.*, 61: 133–144.
- Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T., 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247: 1431-1438.
- Taylor H.M., 1983. A program to increase plant available water through rooting modification. Pp 463-462. In *Root Ecology and Its Practical Application*. Int. Symp., Gumpenstein. Sep 1982. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, A-8952 Irding.
- Taylor H.M., Robertson G.M., Parker J.J. Jr, 1966. Soil strength – root penetration relations for medium to coarse – textured soil materials. *Soil Sci.* 102: 18-22.
- Thomson A.M., Izaurralde R.C., Rosenberg N.J., He X, 2006. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (2006) 195–209
- 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.
- Tisdall J.M., 1996. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Carter M.R., Stewart B.A. (Eds.), "Structure and organic matter storage in soils", CRC Press, Boca Raton, FL: 57-95.
- Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B., Zhai P., 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L.,(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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.
- 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.
- Ungaro F., 1997. Modelli per la descrizione del flusso di soluti nel suolo: approcci, struttura e finalità. Progetto SINA "Modelli e pedofunzioni per la stima delle qualità dei suoli influenti sulla vulnerabilità delle acque". Rapporto 1.1 (1997)
- 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.
- Vitousek P.M., Turner D.R., Parton W.J., Sanford R.L., 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 75: 418–429.
- 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.
- Williams J.R., 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. U.S. Dep. Agric., Agric. Res. Ser., ARS-S-40.
- Williams J.R., 1995. The EPIC model, 1995. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, pp. 909–1000.
- Williams J.R., Renard K.G., Dyke P.T.; 1983. A new method for assessing the effect of erosion on productivity – the EPIC model. *Journal of Soil and Water Conservation* 38: 381-383.
- Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T., 1990. The EPIC model. In *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator model documentation*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Technical bulletin number 1768, 3-92.
- Williams J.R., Renard K.G., 1995. Assessments of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). In R.F. Follett and B.A. Stewards, ed., *Soil Erosion and Crop Productivity*. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. pp. 67-103.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537. Pag 58.
- 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*. Volume 139, Issues 3-4, 15 May 2007, Pages 412-419.