



## **Università degli Studi della Tuscia di Viterbo**

Dipartimento per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia (DAFNE)

Corso di Dottorato di Ricerca in:

**ORTOFLOROFRUTTICOLTURA - XXVII CICLO**

Anno Accademico 2012-2015

### **“MISURA E SIMULAZIONE DEI FLUSSI DI CARBONIO IN SISTEMI COLTURALI ERBACEI NELLA PROVINCIA DI VITERBO”**

Settore scientifico disciplinare: AGR/02

**DOTTORANDO:**

Stefano Ponziani

**COORDINATORE:**

Ch.mo Prof Giuseppe Colla

**TUTORE:**

Ch.mo Prof. Raffaele Casa

7 Luglio 2015

# INDICE

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Riassunto.....</b>                                                             | <b>4</b>  |
| <b>Abstract.....</b>                                                              | <b>6</b>  |
| Ringraziamenti .....                                                              | 8         |
| <b>Premessa .....</b>                                                             | <b>9</b>  |
| <b>1. Introduzione .....</b>                                                      | <b>11</b> |
| 1.1. Strategie di gestione dei flussi GHG in agricoltura.....                     | 13        |
| 1.2. Ciclo del carbonio .....                                                     | 15        |
| 1.2.1. Il Bilancio del Carbonio in un agro-ecosistema.....                        | 18        |
| 1.2.2. Stime di Bilancio del Carbonio nelle aree agricole .....                   | 19        |
| 1.3. Dinamiche dei flussi : uso dei modelli di simulazione .....                  | 20        |
| 1.4. The Denitrification-Decomposition model (DNDC) .....                         | 23        |
| 1.5. Diffusione delle colture studiate nella Provincia di Viterbo .....           | 24        |
| <b>2. Obiettivi della ricerca .....</b>                                           | <b>25</b> |
| <b>3. Materiali e metodi .....</b>                                                | <b>26</b> |
| 3.1 Misure del bilancio del carbonio presso il sito di Roccarespampani (VT) ..... | 26        |
| 3.1.1 Descrizione sito sperimentale .....                                         | 27        |
| 3.1.2 Itinerari tecnici .....                                                     | 27        |
| 3.1.3. Acquisizione dati meteorologici .....                                      | 28        |
| 3.1.4. Tecnica eddy covariance.....                                               | 28        |
| 3.1.5. Rilievi effettuati sulle colture.....                                      | 31        |
| 3.1.5.1. Rilievi sulla biomassa epigea .....                                      | 31        |
| 3.1.5.2. Rilievi sulla biomassa ipogea .....                                      | 33        |
| 3.1.5.3 Analisi del contenuto di C e N.....                                       | 34        |
| 3.1.6. Rilievi effettuati sul suolo .....                                         | 35        |
| 3.1.6.1. Rilievi di umidità del suolo .....                                       | 36        |
| 3.1.6.2. Densità apparente .....                                                  | 37        |
| 3.1.6.3. Misura pH del suolo .....                                                | 38        |
| 3.1.6.4. Analisi del carbonio organico.....                                       | 38        |
| 3.1.6.5. Analisi dell'azoto totale e dell'azoto nitrico del suolo .....           | 40        |
| 3.1.6.6. Misure ancillari respirazione del suolo.....                             | 42        |
| 3.1.6.7. Misura del protossido di azoto.....                                      | 43        |

|                                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2. Applicazione del modello DNDC per le simulazione dei flussi di C nella Provincia di Viterbo .....                                     | 45         |
| 3.2.1 Simulazioni a livello di sito .....                                                                                                  | 45         |
| 3.2.2 Simulazioni a livello regionale.....                                                                                                 | 46         |
| 3.2.2.1. Classificazione territoriale della Provincia di Viterbo .....                                                                     | 48         |
| 3.2.2.2. Database pratiche agricole provinciali .....                                                                                      | 50         |
| 3.2.3. Valutazione dei risultati delle simulazioni con DNDC .....                                                                          | 52         |
| 3.2.3.1. Analisi statistiche a livello di sito.....                                                                                        | 53         |
| 3.2.3.2. Analisi dell'incertezza a livello regionale .....                                                                                 | 55         |
| <b>4. Risultati e Discussioni .....</b>                                                                                                    | <b>57</b>  |
| 4.1 Andamento dell'accrescimento, risultati produttivi e flussi di C dei sistemi colturali misurati presso il sito di Roccarespanpani..... | 57         |
| 4.1.1. Stagione colturale 2009-2010.....                                                                                                   | 57         |
| 4.1.2 Stagione colturale 2010-2011.....                                                                                                    | 61         |
| 4.1.3 Stagione colturale 2011-2012 .....                                                                                                   | 65         |
| 4.1.4 Stagione colturale 2012-2013 .....                                                                                                   | 71         |
| 4.2. Contenuto di C e N nei campioni vegetali .....                                                                                        | 80         |
| 4.3. Radiazione fotosinteticamente attiva (fPAR).....                                                                                      | 83         |
| 4.4. Risultati dei rilievi effettuati sul suolo .....                                                                                      | 84         |
| 4.4.1. Densità apparente .....                                                                                                             | 84         |
| 4.4.2. Reazione del terreno.....                                                                                                           | 86         |
| 4.4.3. Risultati delle analisi di carbonio organico del suolo .....                                                                        | 86         |
| 4.4.4. Analisi dell'azoto totale e nitrico del suolo .....                                                                                 | 88         |
| 4.5. Misure ancillari di flussi di gas ad effetto serra dal suolo.....                                                                     | 90         |
| 4.6. Bilancio del carbonio e dei gas serra nell'agro-ecosistema a livello di sito .....                                                    | 92         |
| 4.7. Simulazioni di NEE a livello di sito mediante il modello DNDC .....                                                                   | 97         |
| 4.8. Simulazioni di NEE per la Provincia di Viterbo mediante il modello DNDC.....                                                          | 100        |
| 4.8.1. Informazioni agronomiche estratte dal database delle pratiche agricole. ....                                                        | 100        |
| 4.8.2. Simulazione del NEE del frumento duro .....                                                                                         | 105        |
| 4.8.3. Simulazioni regionali NEE trifoglio incarnato .....                                                                                 | 107        |
| <b>5. Conclusioni .....</b>                                                                                                                | <b>109</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                                                                                                                  | <b>112</b> |

## Riassunto

La comunità scientifica internazionale concorda che i cambiamenti climatici in atto, sono causa delle attività antropiche. Si stima che annualmente l'agricoltura influisca mediamente con le emissioni in atmosfera di gas serra in modo diretto ed indiretto, ad una quota compresa tra 9~12 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup>, pari a circa al 24% delle emissioni globali.

Nel settore agricolo la variabilità e le incertezze su come i cicli biogeochimici del suolo, influenzino tali emissioni, limitano le attuali politiche di mitigazione a scala regionale, in quanto, le emissioni di GHG sono fortemente influenzate dal tipo di coltura, dalle condizioni climatiche e dalle pratiche agricole locali. Nella Provincia di Viterbo, che ricopre una superficie pari a circa 2.810 km<sup>2</sup>, caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo con siccità estiva, ci sono stati pochi studi approfonditi riguardanti il bilancio del carbonio che si determina durante la coltivazione delle colture erbacee. In questo contesto, per quantificare e contrastare i flussi di gas serra responsabili dei cambiamenti climatici, la ricerca effettuata nell'ambito di questo lavoro, ha riguardato la misura ed il monitoraggio dei flussi di carbonio (Net Ecosystem Exchange) a livello di sito sperimentale con la tecnica eddy covariance, determinando il bilancio del carbonio, (NECB) per le annate agrarie a partire dal 2009 sino al 2013.

A livello regionale, si è stimato, per l'anno 2009, il flusso di NEE, durante la coltivazione del frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e del trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.), colture agrarie caratteristiche del panorama agricolo della Provincia di Viterbo. Per determinare la distribuzione spaziale dei flussi sono state utilizzate immagini satellitari LANDSAT ed il modello di simulazione DNDC 9.5. Le informazioni agronomiche utilizzate come input dal modello per la simulazione regionale sono state estratte da un database di pratiche agronomiche, realizzato durante il dottorato, il quale raccoglie dettagliate informazioni sulla gestione colturale utilizzata nella Provincia di Viterbo. I risultati ottenuti a livello di sito ci hanno permesso di comprendere come le colture di erbai e di trifoglio sono dei sink, con un range che varia da -25,65 g C equivalenti m<sup>-2</sup> a -464,78 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, in quanto riescono a immagazzinare nell'agroecosistema più carbonio di quanto ne perdono, mentre il frumento duro si è rivelato una fonte di carbonio (source) ma con valori molto bassi pari a 16,05 g C equivalenti m<sup>-2</sup>.

Il caso di studio sviluppato a livello regionale ha permesso di valutare la distribuzione spaziale dei flussi di NEE nella provincia di Viterbo. Questa applicazione preliminare ha consentito una maggiore

comprensione, di come le pratiche agricole, associate alla gestione delle colture erbacee prese in esame, possano influire tali flussi, diminuendo in parte le incertezze dovute alle variabili che entrano a far parte nei cicli biogeochimici del terreno, migliorando la comprensione delle dinamiche dei flussi dei gas serra nel settore agricolo della Provincia di Viterbo. Questa ricerca con dovuti approfondimenti potrebbe essere un punto di partenza, per possibili attuazioni di strategie volte alla riduzione e mitigazione, dell'impatto negativo che hanno i gas serra rilasciati dal settore agricolo nei cambiamenti climatici.

Parole chiave: bilancio del carbonio, eddy covariance, emissioni gas serra GHG, simulazioni spaziali, pratiche agronomiche.

## Abstract

The international scientific community agrees that climate changes are caused by human activities. It is estimated that annually agriculture affects atmospheric emissions of greenhouse gases directly and indirectly, to a share between 9 ~ 12 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup>, approximately 24% of global emissions. In the agricultural sector the variability and uncertainty of how the biogeochemical cycles of the soil affect the fluxes of such emissions, are not well known and are currently under investigation, since GHG emissions are strongly influenced by the type of crop, climatic conditions and the local agricultural practices.

In the agricultural sector of the province of Viterbo, that covers an area of approximately 2.810 km<sup>2</sup>, characterized by a Mediterranean climate with dry summer, there have been a few studies taking into account the fluxes of carbon that are determined during the cultivation of field crops. In this context, in order to quantify and to contrast the fluxes responsible for climate change, the research carried out in these years of study, has measured and monitored carbon fluxes (Net Ecosystem Exchange) at the experimental site with the eddy covariance technique, defining the carbon balance, (NECB) for the agricultural years from 2009 until 2013.

At the regional level, the fluxes of NEE were estimated during the cultivation of durum wheat (*Durum wheat* Desf.) and crimson clover (*Trifolium incarnatum* L.), two characteristic crops of agricultural landscape of Viterbo. To determine the spatial fluxes of NEE, images from LANDSAT 2009 satellite and the DNDC 9.5 simulation model have been used. The information used as agricultural inputs in the model to simulate at the regional level was extracted from the database of crop management, assembled during this PhD research. This database contains information about agronomic practices characteristic for the Province of Viterbo, applied during the crops cultivation.

The results obtained at the site allowed us to understand how the fodder crop and grassland are sink of carbon, with a range that varies from -25.65 g C m<sup>-2</sup> equivalent to -464.78 g C m<sup>-2</sup> equivalent, because they can store more carbon in the agro ecosystem than they lose, while durum wheat has revealed a carbon source but with very low values 16.05 g C m<sup>-2</sup> equivalent.

At the regional simulation the spatial distribution of the fluxes of NEE has allowed to understand how farming practices, associated with the management of the examined field crops, may affect these fluxes, partly by reducing the uncertainties due to the variables that become part in biogeochemical cycles of the soil, improving the understanding of the dynamics of the fluxes of greenhouse gases in the agricultural sector of the Province of Viterbo.

This research with further in-depth analysis could be a starting point for possible implementations of reduction strategies and mitigation in agriculture landscape in Central Italy.

Keywords: carbon balance, eddy covariance, greenhouse gases (GHG) emissions, crop management, spatial simulation

## **Ringraziamenti**

Vorrei ringraziare tutti coloro che hanno contribuito allo svolgimento della tesi di dottorato, il mio tutor Prof. Raffaele Casa, che con i suoi consigli e le sue conoscenze scientifiche mi ha accompagnato nel percorso formativo anche nei momenti difficili, il ricercatore Dott. Fabio Castaldi per il contributo allo svolgimento della ricerca, il personale tecnico del dipartimento DAFNE, Dott. Giampiero Ubertini e il Sig. Sergio Pampaloni per la professionalità dimostrata durante il reperimento dei campioni nei siti sperimentali. Il dipartimento DISAFRI Prof. Dario Papale, Dott.ssa Eleonora Canfora, Dott. Simone Sabbatini per la disponibilità e la condivisione dei dati scientifici eddy covariance. Il team Environmental modelling, della School of Biological Sciences, University of Aberdeen (U.K), specialmente il Prof. Pete Smith per avermi ospitato nel gruppo di ricerca, consigliandomi sulle applicazioni del modello DNDC, il progetto EU FP7 GHG-Europe, che grazie alla disponibilità dei fondi europei mi ha dato la possibilità di perseguire la formazione scientifica nel dottorato di ricerca. Ringrazio di cuore la mia famiglia, per il quotidiano supporto delle mie attività, in particolare mia mamma Annamaria e Olga.

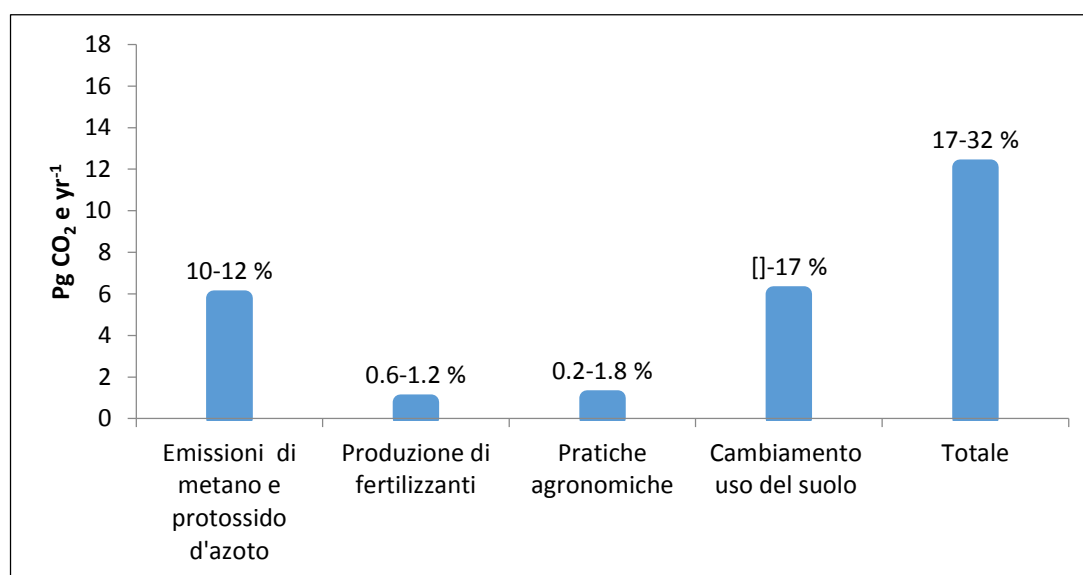
## Premessa

E' da circa ventisette anni che la comunità scientifica internazionale, con la formazione del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel 1988, si occupa dello studio e della comprensione del riscaldamento globale e di come tale fenomeno possa influenzare le attività socio-economiche del pianeta e gli ecosistemi naturali. Negli ultimi 150 anni la temperatura media della superficie terrestre è aumentata di circa  $0.74 \pm 0.18$  °C e la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) è passata dai 310 ppm del 1958, ai 398 ppm del 2015 (IPCC, 2014; UNFCCC, 2014). Le previsioni del trend dell'anidride carbonica a livello globale, indicano un maggiore aumento della concentrazione in atmosfera pari a circa 2 ppm annue, inoltre bisogna aggiungere anche l'incremento di altri gas, denominati "serra" in quanto per le loro caratteristiche chimico-fisiche sono responsabili del riscaldamento globale, come il metano (CH<sub>4</sub>) e il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O). Questa stima di previsione al rialzo è dovuta ad una serie di fattori, collegati alle attività umane globali, principalmente all'utilizzo dei combustibili fossili, alla deforestazione e al cambiamento di utilizzazione del suolo, dovuto all'urbanizzazione e alla maggiore richiesta di prodotti agricoli primari (incremento demografico). L'incremento della concentrazione di CO<sub>2</sub> e degli altri gas serra GHG (Green House Gases) comporta un aumento globale delle temperature superficiali perché essi intrappolano la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre (Jansen et al., IPCC, 2007a). Le temperature globali sono attualmente le più calde degli ultimi cinque secoli e se la dinamica dei flussi di GHG continua su questi ritmi, entro la fine del XXI secolo è previsto un riscaldamento della superficie terrestre compreso tra un range di 1.1 °C e 6.4°C, a seconda dello scenario ipotizzato nelle simulazioni dei modelli previsti per il calcolo del riscaldamento globale (Meehl et al., IPCC, 2007b). Il fenomeno del riscaldamento della superficie terrestre comporta il rapido scioglimento dei ghiacciai perenni e delle calotte glaciali polari, con il conseguente aumento del livello del mare e l'alterazione degli ecosistemi (Norby et al., 1999). Nel breve periodo alcune tipi di piante (C4) reagiscono all'incremento di CO<sub>2</sub> con un aumento della fotosintesi e del tasso di crescita vegetativo (Drake et al., 1997), ma la sostenibilità, nel lungo periodo di questo aumento di produzione è precario e dipende dalla disponibilità di acqua e nutrienti nei vari ambienti, dalla temperatura e dalla competizione per la luce (Norby et al., 1999). Risulta evidente che le emissioni presenti e future di GHG hanno una significativa probabilità di produrre pericolosi impatti fisici, biologici e socioeconomici (Rosenzweig et al., 2008, IPCC 2007c, IPCC 2014). I governi mondiali, per far fronte al problema, cercano di attuare delle strategie di mitigazione e adattamento agli attuali cambiamenti climatici, come la diminuzione di tutte le emissioni di gas serra ratificate per la prima volta con il

Protocollo di Kyoto nel 1997 e successivi accordi. Recentemente il trattato di Doha stipulato nel 2012 è il trattato internazionale che impegna i governi mondiali ad attuare delle politiche strategiche per far fronte all'emergenza climatica. La responsabilità dei cambiamenti climatici è legata alle attività antropiche, in diversi campi si sta intervenendo sulla diminuzione delle emissioni. L'agricoltura fornisce cibo e materie prime per circa sette miliardi di persone ogni anno, contribuendo con una quota del 24%, pari ad un range che si aggira tra i 9~ 12 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup> sul totale delle emissioni (Tubiello et al.,2014). Nello specifico si è registrato un notevole aumento della quota dovuta ai flussi di gas serra, causate principalmente dalla deforestazione, dalla gestione delle pratiche agricole (fertilizzazione, lavorazione del terreno) e alla crescita degli allevamenti intensivi nei paesi industrializzati ed in via di sviluppo. Un'altra quota rappresentativa delle cause primarie delle emissioni nel settore agricolo, riguarda il cambiamento dell'uso del suolo, da forestale ad agricolo e l'urbanizzazione, problema presente soprattutto nei paesi in via di sviluppo dove si registra un aumento delle emissioni globali. Le stime per i prossimi 30 anni, a causa dell'esplosione demografica dei paesi emergenti (9 miliardi di persone entro il 2050) ed alla conseguente maggiore richiesta di prodotti alimentari mettono in allarme la comunità mondiale, a causa delle emissioni legate al settore agricolo ed ad un possibile aumento del 30% del totale (Smith et al., 2014). Dunque intervenire nell'agricoltura con dei progetti legati alla comprensione dei cicli biogeochimici e al monitoraggio dei gas serra che si sviluppano nel ciclo produttivo del settore agricolo è estremamente importante per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione di tali flussi nel tempo. L'urgenza di individuare delle politiche a scala mondiale che ogni singolo agricoltore a livello nazionale deve rispettare nella sua azienda, dovrebbero contribuire alla riuscita finale del progetto. Dal 2000 l'IPCC, ha stilato delle linee guida su come eseguire le pratiche agricole per preservare il carbonio nel ciclo aziendale (IPCC, 2006).

## 1. Introduzione

Si stima che annualmente l'agricoltura contribuisce direttamente e indirettamente tra 9~12 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup> alle emissioni globali di gas a effetto serra (pari a circa al 24 % del totale). Tali emissioni sono così suddivise, in base al gas responsabile del surriscaldamento: metano CH<sub>4</sub> (3.3 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup>) protossido di azoto N<sub>2</sub>O (2.8 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup>) ed anidride carbonica CO<sub>2</sub> (0.04 Pg CO<sub>2</sub> eq yr<sup>-1</sup>). La fonte principale di protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) è legata alle fertilizzazioni azotate nel terreno, mentre il metano (CH<sub>4</sub>) proviene dalla fermentazione enterica del bestiame poligastrico (soprattutto bovini) costituendo la fonte più consistente, (circa il 35%) del totale delle emissioni non-CO<sub>2</sub> dal settore agricolo (Smith et al., 2008). La Fig. 1 riassume le emissioni dirette e indirette delle attività agricole mondiali (Bellarby et al., 2008).



**Figura 1.** Contributo globale del settore agricolo alle emissioni di gas serra (Bellarby et al., 2008)

A livello globale il flusso in atmosfera dei gas come il metano agricolo (CH<sub>4</sub>) ed il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) sono aumentati del 17%, confrontando le osservazioni effettuate dal 1990 al 2005. La comunità scientifica internazionale stima nell'imminente futuro, entro il 2030, un aumento considerevole della quota di gas serra nell'atmosfera dovuta al metano e al protossido d'azoto, pari ad una quota variabile dal 35 fino al 60%. Tale aumento è causato da una crescente utilizzazione dei fertilizzanti azotati e dalle maggiori produzioni zootecniche, soprattutto nei paesi emergenti. La produzione di fertilizzanti, da parte delle aziende che lavorano nel settore dell'agrochimica, contribuisce annualmente ad una quota di circa 600 milioni di tonnellate di C equivalente (Tab.1). Le percentuali di utilizzazione dei fertilizzanti azotati variano notevolmente tra le zone del mondo e tra le regioni di una nazione, con la

Cina che contribuisce a livello mondiale con una quota pari al 40 % al consumo di fertilizzanti di sintesi. Le pratiche agronomiche, come le lavorazioni del terreno, sono uno dei fattori più variabili nelle zone agricole del mondo, con emissioni che variano tra 0.06 e 0.26 Pg CO<sub>2</sub>-eq yr<sup>-1</sup>.

**Tabella 1.** Emissioni dirette e indirette dei gas serra nel settore agricolo, ripartizione per tecnica agricola (Bellarby et al., 2008)

| Fonti di emissione agricolo       | Milioni di tonnellate<br>(CO <sub>2</sub> equivalenti) |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Protossido d'azoto dal suolo      | 2.128                                                  |
| Metano da fermentazione enteriche | 1.792                                                  |
| Incendi delle biomasse            | 672                                                    |
| Produzione di riso                | 616                                                    |
| Concimazione                      | 413                                                    |
| Produzione di fertilizzanti       | 616                                                    |
| Irrigazione                       | 369                                                    |
| Pratiche agronomiche              | 158                                                    |
| Produzione di pesticidi           | 72                                                     |
| Cambiamento uso del suolo         | 5.900                                                  |

La quantità di carbonio immagazzinato nelle terre coltivate a livello globale, annualmente è di media il più basso registrato tra tutti i tipi di terreno (ad eccezione delle aree desertiche) rispetto ai suoli naturali e forestali. Pertanto, tutti i cambiamenti di uso del suolo da forestale a prato permanente e/o a terra coltivata, si tradurrà in un'emissione netta di carbonio. Il contributo causato dal cambiamento di uso del suolo per quanto riguarda le emissioni di gas serra, ha una elevata incertezza, ma è stimato essere compreso in un range tra i  $5.9 \pm 2.9$  Pg CO<sub>2</sub>-eq yr<sup>-1</sup>. L'espansione delle terre coltivate a discapito di zone naturali e forestali, registrato a livello mondiale nell'ultimo decennio, continua ad essere uno dei principali problemi nei Paesi in via di sviluppo e soprattutto nelle aree tropicali. Si stima che nel 2050 ci saranno 9 miliardi di persone sulla terra e questo comporterà una domanda sempre maggiore di cibo, di conseguenza aumenteranno le emissioni dei gas serra da parte del settore agricolo (Smith et al., 2014).

## 1.1. Strategie di gestione dei flussi GHG in agricoltura

La comunità scientifica internazionale concorda che i cambiamenti climatici in atto, sono causati dalle attività antropiche (Haylock et al., 2008). Per fare fronte a tale fenomeno si sta cercando di diminuire le emissioni dei gas serra in tutti i settori di produzione (esempio nel settore industriale ed energetico) ed anche il settore agricolo deve affrontare delle strategie di mitigazione ed abbattimento. In linea di massima, la comunità scientifica internazionale, suggerisce d'indirizzare le politiche ambientali verso le seguenti soluzioni:

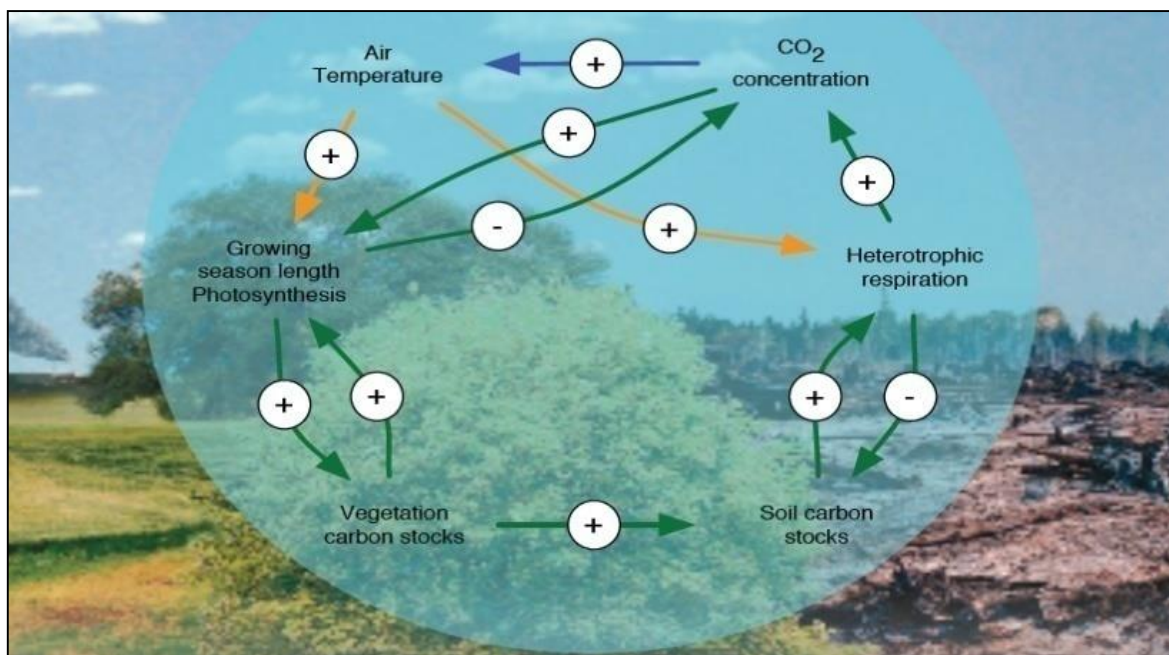
- Ridurre le correnti emissioni di GHG nell'atmosfera terrestre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ).
- Incrementare la possibilità di rimuovere dall'atmosfera i GHG presenti, incentivando il sequestro del carbonio.
- Diminuire l'uso delle risorse non rinnovabili (petrolio, carbone) per produrre energia, preferendo le risorse rinnovabili e garantire una protezione alle riserve di carbonio organico nel terreno e nelle foreste

Nel 1992 la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) ha individuato i settori delle attività antropiche responsabili delle dinamiche dei flussi e nel 1997 il protocollo di Kyoto ha ratificato la convenzione per l'attuazione delle misure di mitigazione. Dopo il trattato stipulato nel 1998 e le successive modifiche, i governi mondiali hanno intrapreso delle politiche volte all'incentivazione di tali misure, basandosi sulle linee guide redatte dalle agenzie scientifiche internazionali (IPCC, 2006). Gli agricoltori hanno un ruolo significativo per la gestione delle emissioni di gas serra che contribuiscono ai cambiamenti climatici. Il bilancio tra emissione ed assorbimento di carbonio (e carbonio equivalente) è strettamente legato alle pratiche agricole utilizzate (IPCC, 2003). La gestione agronomica razionale delle terre agricole comporta una lavorazione del terreno in condizioni di tempera, evitando le lavorazioni profonde (arature superiori ai 40 cm), per preservare il contenuto di sostanza organica nel suolo e mantenere una struttura che favorisca le naturali caratteristiche chimico-fisiche del terreno agrario. Nei terreni acclivi è particolarmente consigliato lavorare il suolo in maniera superficiale secondo le curve di livello, gestendo in maniera ponderata la regimazione delle acque superficiali, sfavorendo l'erosione del terreno ricco di sostanza organica, tramite l'instaurazione di canali e canalette di sgrondo. Le aziende dovrebbero rispettare le soglie di sicurezza legiferate da ogni regione per l'applicazione dei concimi azotati di sintesi e le fertilizzazioni organiche, contrastando i fenomeni di lisciviazione e inquinamento delle falde acquifere. Le rotazioni pluriennali sono da favorire rispetto alle

monosuccessioni e prevedere all'interno di esse coltivazioni cover crop. Altre misure agro ambientali che dovrebbero essere rispettate e incentivate per favorire la strategia di mitigazione sono: l'inerbimento delle colture arboree, lo stoccaggio dei reflui di allevamento, la gestione dei pascoli rispettando i carichi di bestiame e le soglie di intensità di pascolo, il mantenimento di aree marginali per il mantenimento della fertilità del suolo. L'utilizzo di impianti di irrigazione che favoriscono un uso razionale dell'acqua, risparmiando sprechi. Le linee guida, differenti per ogni sistema colturale, per ogni tipologia di conduzione aziendale e differenti obiettivi produttivi (esempio cerealicolo, zootecnico, ortivo) determinano il variare del bilancio di carbonio e carbonio-equivalenti scambiati in un agro-ecosistema. Un problema che si riscontra nella gestione delle emissioni nel settore agricolo è che tali emissioni sono particolarmente associate al tipo di pratiche agronomiche e alle condizioni climatiche. Le misure potenziali di mitigazione sono caratterizzate da un'alta variabilità dovuta soprattutto anche all'ubicazione dell'azienda agraria, infatti nei paesi sviluppati ci sono delle politiche che aiutano gli agricoltori con dei sussidi economici, dunque sono incentivati a mantenere un certo tipo di gestione, mentre nei paesi in via di sviluppo e in quelli emergenti l'applicazione delle misure risulta più problematica a causa di una mancata politica agricola e ad una gestione che punta più al reddito di sussistenza. In definitiva le pratiche agricole possono dare un contributo alla contrazione dei GHG perché lo strato superficiale del terreno agrario ha un ruolo determinante nella gestione del carbonio (Eugster et al., 2010). La riduzione di flussi di carbonio nelle colture annuali e una corretta gestione agronomica del suolo, preferendo la conservazione del carbonio organico (minimum tillage, fertilizzazioni organiche) porterebbe una notevole contrazione delle emissioni agricole, stimata a circa al 89% dei GHG se adottate da oggi in tutte le aziende del mondo, sino al 2030 pari a ad un valore di circa 4.895-5.380 Mt CO<sub>2</sub> equivalenti annuale (Smith et al., 2008).

## 1.2. Ciclo del carbonio

Il ciclo del carbonio è un ciclo biogeochimico nel quale l'elemento carbonio (C), viene scambiato attraverso una delle diverse componenti del pianeta terrestre, tali settori sono l'atmosfera, l'idrosfera (mari e oceani) e la biosfera (suolo e vegetazione). Il ciclo è infatti solitamente inteso come l'interscambio dinamico tra queste componenti. Gli oceani contengono la maggior riserva di carbonio presente sulla Terra, sebbene essa sia solo in piccola parte disponibile all'interscambio con l'atmosfera. Le dinamiche di interscambio sono legate a processi chimico-fisici, geologici e biologici. Il bilancio del carbonio è il bilancio degli scambi (entrate e perdite) tra le riserve di carbonio o tra uno specifico processo del ciclo del carbonio. Un esame del bilancio di carbonio può fornire informazioni se questa stia funzionando da fonte o da riserva di carbonio (Cias et al., 2009). In un ecosistema terrestre la vegetazione sequestra anidride carbonica attraverso l'attività fotosintetica, con rilascio di ossigeno in atmosfera e trasforma il carbonio da inorganico a organico. Questo processo avviene in presenza di luce e ha luogo sull'interfaccia foglia-atmosfera. Una parte del carbonio assimilato dalle piante viene accumulato nella biomassa vegetale ed una parte viene rilasciata in atmosfera attraverso la respirazione. I flussi di CO<sub>2</sub> hanno un andamento stagionale che rispecchiano le fasi fenologiche della vegetazione, e queste sono regolate a loro volta dal variare della temperatura e del numero di ore di luce a disposizione nel corso della stagione vegetativa (Janzen et al., 2004). La Fig. 2 sintetizza il ciclo del carbonio in un ecosistema naturale e tutte le componenti che ne fanno parte. Tutte le componenti sono tra loro interconnesse ed il carbonio circola tra le componenti. La CO<sub>2</sub> atmosferica entra a far parte della biomassa attraverso la fotosintesi, una quota viene temporaneamente immagazzinata nei tessuti vegetali e poi entra a far parte del suolo dopo la senescenza. La respirazione degli organismi eterotrofi (dovuta in larga parte ai microrganismi del suolo) e gli eventuali incendi restituiscono all'atmosfera una quantità di carbonio chiudendo il ciclo. Questa differenza nel processo di fotosintesi e nel ciclo del carbonio può essere negativa (sink) quando nel bilancio complessivo il sistema immagazzina il carbonio, o positiva (source) in quanto l'ecosistema potrebbe rilasciare più carbonio di quanto ne fissi, dovuta alla maggiore respirazione delle piante e ai processi biogeochimici del terreno, come l'umificazione (Reichstein et al., 2005).



**Figura 2.** Schematizzazione del ciclo del carbonio in un ecosistema terrestre (Reichstein et al., 2005).

Il carbonio immagazzinato nel suolo gioca un ruolo importante nei processi legati al cambiamento climatico globale, in quanto i suoli possono agire da source o da sink di CO<sub>2</sub> atmosferica a seconda delle circostanze (Díaz-Hernandez, 2010). Le alterazioni di origine antropica del suolo intensificano le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alla decomposizione della sostanza organica o della respirazione del suolo (Schlesinger et al., 2000). Tali emissioni sono accentuate dalle attività agricole, tra cui la deforestazione, la combustione di biomasse e le lavorazioni del suolo profonde come lo scasso e l'aratura. Pertanto l'uso del suolo ha un forte impatto sulle riserve di carbonio sotto forma di sostanza organica. D'altra parte, un aumento della riserva di carbonio nel suolo è in grado di bilanciare, almeno in parte, le emissioni antropogeniche di CO<sub>2</sub> e questo è possibile attraverso una corretta gestione del territorio. Adottando un'appropriata strategia d'uso del suolo, i flussi di carbonio dall'atmosfera verso un ecosistema possono essere aumentati ed il rilascio di carbonio può essere diminuito (Pulleman et al., 2000). Il sequestro di carbonio da parte degli ecosistemi può quindi essere considerato una strategia di mitigazione del cambiamento climatico, avendo la potenzialità di ridurre la concentrazione atmosferica di anidride carbonica, rallentando di conseguenza il riscaldamento globale (Batjes et al., 1999; Smith et al., 2000). Ad esempio si stima che a livello europeo la vegetazione assorba circa il 7-12% delle emissioni antropogeniche di CO<sub>2</sub> (Janssens et al., 2003). La determinazione delle variabili a livello di sito prende in considerazione la dinamica dei flussi in entrata ed in uscita tra le componenti atmosfera, suolo e coltura vegetale che interagiscono nel ciclo del carbonio.

Di seguito descriviamo in sintesi, le variabili che entrano a far parte del ciclo del carbonio e di come vengono utilizzate per calcolo del bilancio del carbonio nell'ecosistema. La quantità di carbonio inorganico che viene organicata e trasformata nell'unità di tempo (di solito riferita ad un'annata agraria) viene definita come GPP (Gross Primary Production). Le piante consumano una parte di questo carbonio attraverso la respirazione autotrofa  $R_a$ . Sottraendo la parte di carbonio consumata dalle piante, si determina la NPP (Net Primary Production), dunque per la determinazione del ciclo di carbonio nello spazio temporale preso in esame, si sottrae dalla Produzione primaria netta (NPP) la respirazione eterotrofa  $R_h$ . Tuttavia le tecniche di misura attualmente utilizzate, basate sulla tecnica dell'eddy covariance (EC) forniscono una stima della respirazione totale dell'ecosistema (TER) e non separata nelle due componenti autotrofa ed eterotrofa, dunque per il calcolo della produzione primaria netta (NEE) possiamo utilizzare semplicemente la seguente equazione:

$$NEE = GPP - TER \quad (1)$$

*Dove:*

*GPP = Gross Primary Production*

*TER = Respirazione totale dell'ecosistema.*

Si definisce NEE (Net Ecosystem Exchange) la quantità di carbonio scambiato in un ecosistema, mediante il calcolo della seguente equazione (Baldocchi et al., 2003):

$$NEE = NPP - R_h = GPP - TER (R_h + R_a) \quad (2)$$

*Dove:*

*NPP = Net Primary Production (Produzione Primaria Netta)*

*$R_h$  = Respirazione eterotrofa*

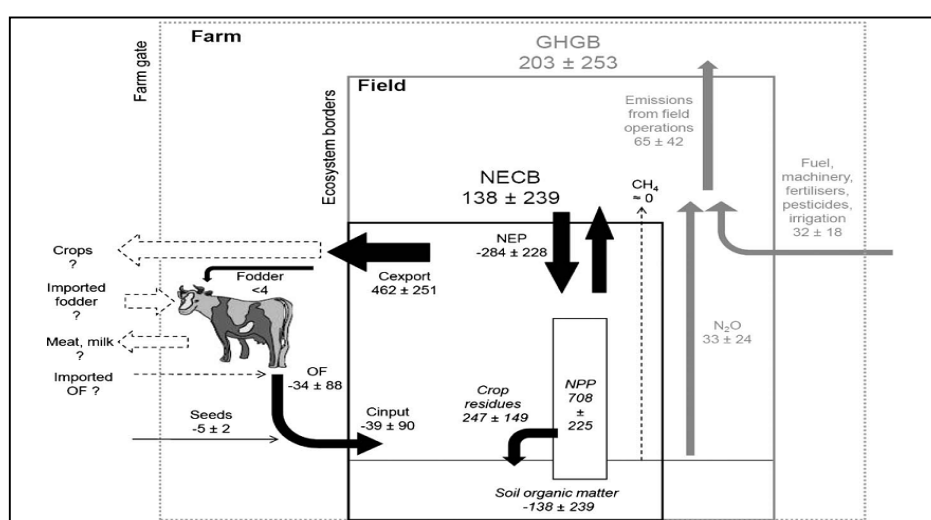
*$R_a$  = Respirazione autotrofa*

*GPP = Gross Primary Production (Produzione Primaria Lorda).*

*TER = Respirazione ecosistema (autotrofa + eterotrofa)*

### 1.2.1. Il Bilancio del Carbonio in un agro-ecosistema.

Nel caso di un agro-ecosistema non è sufficiente calcolare la NEE come descritto nel paragrafo precedente, perché ci sono diversi fattori che devono essere presi in esame nel bilancio del carbonio (Ceschia et al., 2010). La Fig. 3 riassume in modo schematico le componenti che vengono calcolate per il bilancio del carbonio a livello di sito agricolo secondo la metodologia proposta da Ceschia et al., (2010). La metodologia di calcolo, converte in carbonio-equivalenti anche gli altri gas serra (protossido di azoto e metano) che vengono emessi durante le operazioni colturali nel ciclo produttivo agricolo (fertilizzazioni, irrigazione, ecc.)



**Figura 3.** Esempio di bilancio di carbonio di un sito agricolo (Ceschia et al.,2010).

La ricerca effettuata nell'ambito di questo dottorato, ha seguito la metodologia descritta nell'equazione 3, per il calcolo a livello di sito, del bilancio del carbonio (NECB). Utilizzando i dati registrati dalle stazioni eddy covariance, integrandoli con i dati ancillari raccolti durante le stagioni colturali 2009-2013.

$$NECB = NEP + C\ export + F + OF + S \quad (3)$$

Dove:

*NECB* = Net Ecosystem Carbon Budget (Bilancio del Carbonio)

*NEP* = Net Ecosystem Production (NEE cumulativa durante il ciclo colturale)

*C export* = Carbonio asportato dal sistema tramite la raccolta delle produzioni

*F* = se si è verificato un incendio comporta perdite di carbonio,

*OF* = Apporti di carbonio organico, concimazioni, ammendanti

*S* = apporti di carbonio dalla semente

Nell'agroecosistema è possibile calcolare il bilancio del carbonio integrando anche le emissioni dovute ad altri gas serra ( $N_2O$ ,  $CH_4$ ) che si sviluppano durante le pratiche agronomiche (irrigazione, fertilizzazione, consumo di combustibile). La metodologia per il calcolo di questo tipo di bilancio del carbonio integrato è illustrato nella equazione 4.

$$GHGb = NECB + \sum EFO \quad (4)$$

*GHGb* = Green House Gases Budget ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ )

$\sum EFO$  = Emissioni causate dalle operazioni colturali, fertilizzazioni, raccolta, semina, ecc.

### 1.2.2. Stime di Bilancio del Carbonio nelle aree agricole

Negli ultimi decenni, la ricerca scientifica si è concentrata a livello globale, sulla stima e il ruolo che il suolo agricolo ha nei confronti dell'anidride carbonica, quale sink o source di tale gas. Attraverso l'utilizzo delle variabili descritte nel paragrafo precedente. Le terre coltivate possono essere valutate e monitorate a lungo termine (periodi di dieci o più anni) sulla base di un'analisi dei cambiamenti dello stock di carbonio del suolo, oppure possono essere valutate su scale temporali più brevi (annuali) combinando le variabili di input e output di carbonio che entrano e escono nel sistema analizzato (Smith et al., 2010). Diversi autori hanno utilizzato questo tipo di approccio per valutare gli effetti di singole colture in particolari condizioni climatiche, avvalendosi della tecnica della eddy covariance e delle misure ancillari del suolo e della biomassa, per stimare le diverse variabili (NEE, GPP, Ch) che entrano a far parte nel calcolo di stima del bilancio del carbonio (Osborne et al., 2010). Le colture esaminate variano a seconda dell'importanza economica e dalla zona di ricerca. Tra i cereali ricordiamo il riso (Saito et al., 2005) nell'agricoltura asiatica, mais e soia nel Nord America (Suyker et al., 2005), mentre a livello europeo ricordiamo i studi di Beziat et al., (2009) su frumento tenero, girasole e colza nella Francia, di Anthoni et al., (2004) su frumento tenero in Germania. Purtroppo questi studi si limitano a monitorare siti di ricerca o aree specifiche che non forniscono una valutazione globale delle differenze che si potrebbero verificare in base alle pratiche agronomiche e

al clima. Recentemente a livello europeo sono stati fatti degli studi attraverso l'utilizzo di modelli di simulazione, che hanno prodotto stime su scala regionale e nazionale del bilancio del carbonio nel settore agricolo, fornendo un valore per quanto riguarda le terre coltivate di NECB pari a  $90 \pm 50 \text{ g C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$  (Janssens et al., 2003). Mentre studi più recenti (Schulze et al., 2009) suggeriscono che a livello europeo i terreni coltivati sono vicini all'equilibrio, agendo annualmente come piccole fonti di carbonio  $3 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , questo è dovuto alla capacità delle foreste e dei prati naturali di compensare le emissioni di GHG rilasciate dai terreni agricoli. Ciais et al., (2009) stima che il bilancio del carbonio delle aree agricole europee (EU-25) è compreso tra  $-8.3$  e  $33 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , valore ottenuto combinando l'uso di modelli di simulazione a dati presenti su database. Nel breve-medio periodo si prospetta un'agricoltura più intensiva, che utilizza l'uso massiccio di fertilizzanti azotati e una accelerazione al cambio di gestione di uso del suolo, da naturale ad agricolo, favorendo la perdita di equilibrio delle superficie agricola Europea nei confronti dei GHG diventando di fatto una ampia fonte di gas a effetto serra (Eugster et al., 2010). L'uso di modelli di simulazione potrebbe dare un contributo significativo per estendere gli studi sulla stima dei flussi e la valutazione delle diverse variabili nel bilancio del carbonio, sia a livello di sito che di area agricola, prendendo in considerazione le variazioni climatiche e di gestione delle colture erbacee europee (Ceschia et al., 2010).

### **1.3. Dinamiche dei flussi : uso dei modelli di simulazione**

Lo studio delle dinamiche dei gas serra in un agroecosistema, può prevedere l'utilizzo di diverse tipologie di indagine, per un valido monitoraggio di calcolo e stima dei flussi. Le tecniche che vengono utilizzate maggiormente sono le misure in pieno campo tramite la tecnica eddy covariance e l'utilizzazione della metodologia delle camere di respirazione, sia fisse che mobili, fino ad arrivare all'utilizzo del remote sensing (Abdalla et al., 2013). Le tecniche elencate precedentemente sono metodologie costose che richiedono personale altamente qualificato per il campionamento dei dati e il loro sviluppo, soprattutto nei paesi non industrializzati (Van Wesemael et al., 2011). Negli ultimi venti anni, un valido strumento utilizzato dalla comunità scientifica per la comprensione, e lo studio dei cambiamenti climatici in agricoltura è stato fornito dai modelli di simulazione. Tali modelli ci permettono di comprendere le dinamiche di previsione dei diversi scenari climatici che si potrebbero verificare nel prossimo futuro, fornendo delle risposte in tempi brevi ed economicamente vantaggiose per l'attuazione da parte dei governi di potenziali strategie di mitigazione. Tra le decine di modelli di simulazione, sviluppati negli ultimi trent'anni ed utilizzati nelle ricerche scientifiche, DAYCENT (Parton et al., 1987, 1988; Del Grosso et al., 2001), ECOSSE (Smith J.U. et al., 2010a,b) e DNDC (Li

et al., 1992,1996, 2000) sono i più diffusi ed utilizzati per la descrizione dei processi fisici e biochimici legate al ciclo del carbonio e dell'azoto. Il modello DNDC Denitrification Decomposition in particolare è molto utilizzato per studi sulle dinamiche dei flussi sia a livello di sito che scala regionale o nazionale, in quanto grazie alle sue peculiarità appare il più adatto per la stima dei flussi GHG in agricoltura, come riportato nell'articolo di Perlman et al (2013) che mette in evidenza le caratteristiche di DNDC per l'accuratezza della simulazione applicate negli Stati Uniti. L'accuratezza della simulazione è strettamente legata alla capacità del modello di simulare i dati immessi come input nella maniera più realistica possibile. Le fonti degli errori del modello possono essere suddivisi in due categorie:

- Errori dovuti all'incertezza dei dati di input (veridicità/affidabilità dei dati e delle variabili iniziali e dei parametri utilizzati nella simulazione)
- Errori sistematici, causati dalla struttura del modello (legati alle approssimazioni ed assunzioni incluse nel modello).

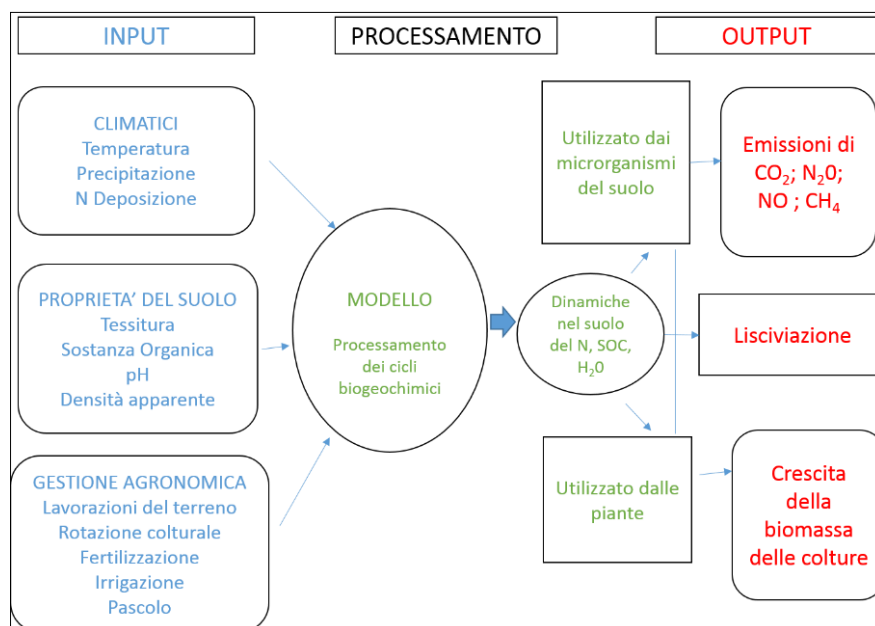
I primi tipi di errore si possono verificare durante il campionamento dei dati osservati nei siti di ricerca da parte degli addetti tecnici nel settore. A problemi dovuti alla strumentazione in campo (calibrazione sbagliata, malfunzionamenti) che se non corretti e applicati come input nel modello di simulazione causano errori di stima. Mentre gli errori sistematici del modello sono causati dal fatto che le equazioni dei modelli sono rappresentazioni imperfette dei processi reali che determinano le emissioni di gas serra. Questi errori possono essere stimati e quantificati facendo un'analisi statistica tra i dati misurati in campo e gli output dei modelli (Del Grosso et al., 2009). Varie statistiche dovrebbero essere utilizzate per la valutazione delle prestazioni del modello, perché ognuno dei modelli utilizzati nell'ambito scientifico, hanno dei punti di forza e di debolezza. Per esempio, il coefficiente di correlazione quantifica quanto bene gli output del modello sono correlati con la misurazione ma non prende in considerazione la distorsione (pregiudizio) del modello stesso. Gli output del modello potrebbero essere perfettamente correlati con le misure reali, ma sono dipendenti dall'affidabilità dei dati misurati. Un esempio pratico che si è registrato nel corso degli anni riguarda le stime della produzione della granella nei cereali che risulta più accurata e precisa delle misure di stima dei flussi di gas serra da parte dei modelli (Gassman et al., 2010). Tuttavia gli errori di stima da parte del modello per le piccole estensioni di terreno possono essere minimi, se tutti i dati di input sono ben noti. I singoli proprietari dei terreni sono in grado di fornire informazioni dettagliate sull'uso del suolo e la sua gestione nel corso degli anni. Questo porta ad un'alta accuratezza dei risultati in piccola scala spaziale ma allo stesso tempo ad una maggiore incertezza nelle misure ad alta scala

spaziale (Olander et al., 2010). L'organizzazione Intergovernmental Panel on Climate change (IPCC) ha sviluppato nel corso degli anni per il monitoraggio, la comprensione e lo studio delle dinamiche dei flussi GHG dei fattori standard, che vengono utilizzati in tutto il mondo per i vari processi associati al settore agricolo, dalle pratiche agronomiche, ai diversi usi del suolo volte per la previsione dei scenari futuri e alle dinamiche dei flussi GHG. Questa metodologia viene utilizzata a livello continentale e nazionale, dando delle stime con un alta variabilità perché essendo su scala spaziale molto ampie che variano da 1km fino a 100 km, l'accuratezza diminuisce in quanto da nazionale a regionale tali fattori standard non tengono conto di molte pratiche di gestione che si compiono a livello regionale in ogni singola azienda. Ovviamente questi dati di default sono utili agli studi per il monitoraggio e la previsione dei flussi, in quanto è inimmaginabile e costosissimo poter avere i dati del suolo e delle colture raccolti nei siti di ricerca a livello mondiale di ogni singola azienda agricola. Anche le misurazioni di protossido di azoto, metano e anidride carbonica tramite la tecnica delle stazioni eddy e con la metodologia delle camere (fisse continue o mobili) sono metodi attuali validi, ma costosi e difficili da usare (soprattutto nei paesi emergenti, mancanza di personale tecnico qualificato) e quindi non sono ancora pronti per l'implementazione su larga scala. Date queste difficoltà, i modelli di simulazione possono essere un modo efficace per quantificare le emissioni e il sequestro di GHG. Di solito si adottano due approcci, il primo utilizza un'analisi di regressione, che utilizza l'analisi statistica dei dati di emissione raccolti nei siti di ricerca di una determinata zona, per poi generare un fattore di emissione che può essere applicato ad una grande regione geografica (Olander et al., 2010). Oppure utilizzare i modelli di simulazione dei processi biogeochimici nel agro-ecosistema, basato su conoscenze storiche a livello di sito o regionale, che utilizza i dati pregressi sulle dinamiche dei gas serra, interagendole con le indicazioni relative alle condizioni ambientali di gestione agraria locale. Quando possibile, è sempre preferibile utilizzare il secondo approccio, infatti con i modelli si riescono a gestire e a cogliere le potenziali interazioni, rispetto ad un'analisi di regressione, degli effetti a livello aziendale di variabilità spaziale e temporale nelle dinamiche dei gas serra. Infatti i modelli di simulazione, basati sui cicli biogeochimici, sono in grado di analizzare diversi tipi di scenario, dal cambiamento ambientale (proprietà fisiche del suolo, clima, topografia) alla gestione del territorio (pascolo, colture erbacee, colture industriali) variabili che possono cambiare durante l'acquisizione delle informazioni temporali e spaziali (Gassman et al., 2010). Questi modelli possono lavorare sia a livello di sito e vengono calibrati e testati utilizzando i dati di esperimenti controllati a lungo termine e osservazione sul campo, sia a livello di regione. Possono produrre stime del cambiamento climatico attribuito alla emissione dei gas serra, fornendo risposte accurate su come variando gli input del sistema, le dinamiche dei flussi cambiano. Per effettuare

questo attraverso i modelli è necessario possedere un'alta gamma di informazioni, dai dati ambientali, alla gestione dell'uso del suolo, alle pratiche agricole colturali. Con i modelli si possono anche osservare le interazioni che si potrebbero instaurare nei molteplici scenari che si combinano con le variabili clima-suolo-cultura agraria nell'agroecosistema. Combinando la tecnica del telerilevamento, si possono calibrare i modelli per i siti specifici, offrendo la migliore soluzione per una ricerca a livello regionale (Olander et al., 2010).

#### 1.4. The Denitrification-Decomposition model (DNDC)

Il modello di simulazione DNDC (Li et al., 1992, 1994, 2007) è stato sviluppato dal gruppo di studio dell'Università del New Hampshire, USA (Institute for the Study of Earth, Oceans and Space). Tale modello è in grado di simulare il ciclo dei gas serra ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) tramite l'utilizzo di equazioni e funzioni matematiche, che riproducono i processi biogeochimici del suolo (ciclo della sostanza organica, nitrificazione, denitrificazione, fermentazione), del ciclo colturale preso in esame. Nell'ambito del presente lavoro abbiamo utilizzato la versione 9.5 (scaricabile gratuitamente dal sito <http://www.dndc.sr.unh.edu>). Lo schema sottostante illustrato nella Fig.4, riassume i principali processi simulati dal modello.



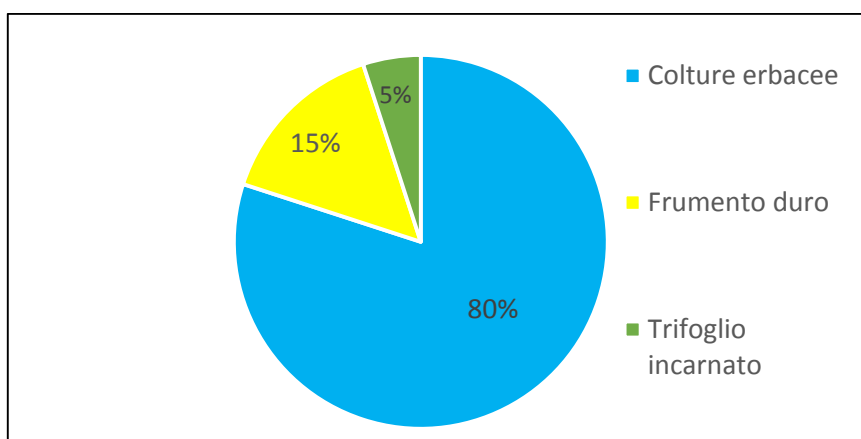
**Figura 4.** Schematizzazione dei cicli biogeochimici utilizzati dalle funzioni matematiche del modello DNDC.

Le variabili di input si dividono in: 1) fattori climatici (temperature massime e minime, precipitazione, radiazione solare); 2) fattori legati alle caratteristiche del suolo (tessitura, pH, sostanza

organica, densità apparente); 3) fattori colturali e di gestione agronomica (tipo di coltura, tipo di lavorazione del suolo, fertilizzazione, irrigazione, pascolo). La peculiarità di questo modello e la semplicità di uso e la facoltà da parte dell'utente di modificare ogni parametro ecologico e ambientale, con le apposite schermate di dialogo, a seconda delle esigenze di studio. La simulazione può essere effettuata sia a livello di sito sia su scala territoriale (Batch multi site regional mode) permettendo d'integrare le simulazioni del modello con tecniche di telerilevamento e di analisi spaziale (GIS).

### 1.5. Diffusione delle colture studiate nella Provincia di Viterbo

Nella Provincia di Viterbo la superficie agricola utilizzabile (SAU) potenziale è di circa 271.425 ha (ISTAT 2009). Si è registrata nel corso degli anni una notevole contrazione del totale delle terre coltivate, soprattutto nel settore seminativo, riscontrando nel 2009 un utilizzo totale della superficie seminativa pari a 193.470 ha. Nel caso di studio che noi affrontiamo a livello Provinciale, nella stima e distribuzione spaziale della NEE, ci siamo soffermati sulla scelta di colture erbacee rappresentative nelle aziende agricole viterbesi, avvalendosi dei dati statistici forniti da ISTAT. Il frumento duro (*Triticum durum* Desf.) è risultata la coltura più comune tra i cereali, mentre tra gli erbai è risultata la coltura di trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.). Spesso queste due colture sono utilizzate in rotazione biennale, rappresentando circa il 20 % della superficie seminativa provinciale nell'annata agraria 2008-2009. Di questa superficie, circa il 15% del totale (23.500 ha) è stato coltivato a frumento duro, mentre circa il 5% del totale (7.200 ha) è stato coltivato ad erbaio di trifoglio incarnato (Fig.5).



**Figura 5.** Percentuale della distribuzione delle colture erbacee nell'annata agraria 2008-2009 nella Provincia di Viterbo, in rosso la quota del frumento duro, in verde la quota del trifoglio incarnato (ISTAT 2009).

## 2. Obiettivi della ricerca

L'agricoltura è una delle attività antropiche che influiscono maggiormente nel rilascio di gas serra nell'atmosfera terrestre. La variabilità e le incertezze di come i cicli biogeochimici del suolo, influenzano il flusso di tali emissioni, non sono ancora ben noti, in quanto, le emissioni di GHG sono fortemente influenzate dal tipo di coltura, dalle condizioni climatiche e dalle pratiche agricole locali (Lugato et al., 2010). La sperimentazione effettuata nell'ambito di questa ricerca ha avuto come obiettivo quello di incrementare le attuali conoscenze su come le pratiche agricole, associate ai cicli colturali della gestione di colture erbacee non irrigue in ambiente Mediterraneo tipico dell'Italia Centrale, influiscano sulle emissioni (source) od assorbimenti (sink) di gas serra, tramite il sequestro o il rilascio del carbonio, diminuendo le incertezze dovute alle variabili che entrano a far parte nei cicli biogeochimici del terreno per questa tipologia di sistemi colturali.

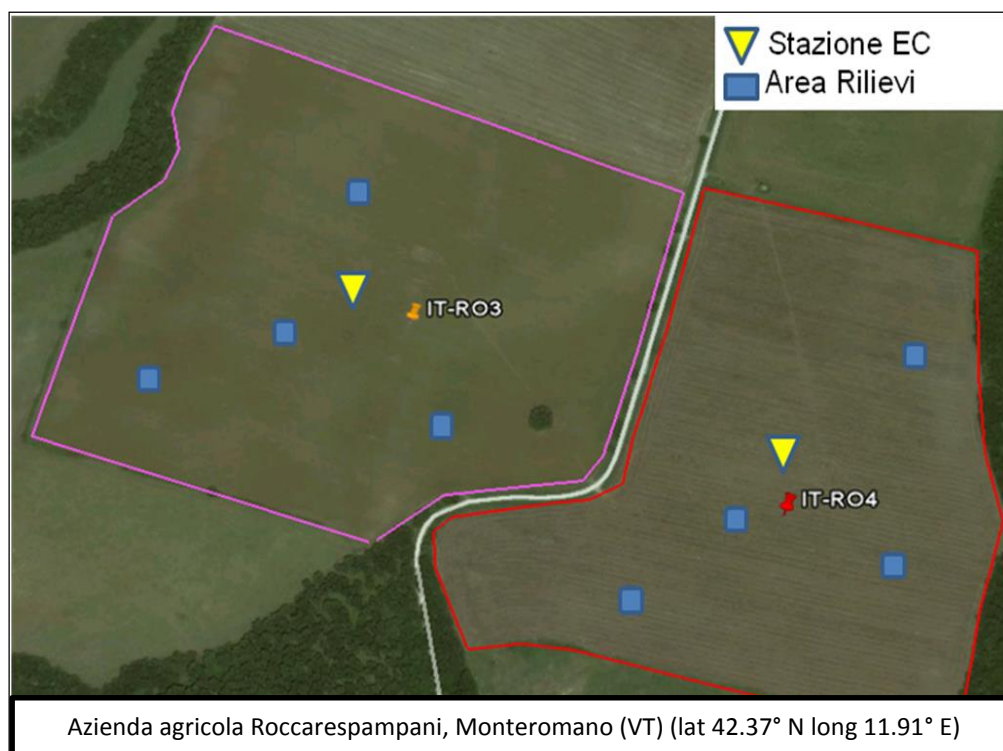
Tale obiettivo è stato perseguito attraverso le seguenti azioni:

- Stima e monitoraggio, presso il sito di Roccarespampani (VT), dei flussi di anidride carbonica tra colture ed atmosfera tramite l'utilizzo della tecnica eddy covariance e calcolo del bilancio del carbonio (NECB, GHGb) nelle diverse annate agrarie.
- Creazione di database contenente informazioni sugli itinerari tecnici utilizzati nella Provincia di Viterbo per le colture maggiormente presenti sul territorio, tramite l'utilizzo di relazione redatte durante gli anni 1987-2007 dagli studenti del corso "Sistemi colturali" e dalle interviste rilasciate dagli imprenditori agricoli ad alcuni laureandi negli anni 2010-2013.
- Utilizzo del modello di simulazione DNDC (Li et al., 1992, 1996, 2000) e delle mappe della distribuzione delle colture stimate tramite immagine satellitari Landsat 5 nel 2009, per spazializzare a livello di Provincia di Viterbo la stima dei flussi di Carbonio, Net Ecosystem Environment (NEE), durante la coltivazione delle colture frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.).

### 3. Materiali e metodi

#### 3.1 Misure del bilancio del carbonio presso il sito di Roccarespampani (VT)

I campi sperimentali in cui si è svolta l'attività di ricerca sono situati nella Provincia di Viterbo, presso l'azienda agricola "Roccarespampani", ubicata nel comune di Monteromano. I campi, identificati rispettivamente come IT-Ro3 (lat 42°22' 31'' N, long 11°54'55''E, altitudine 145 m) e IT-Ro4 (lat 42° 22' 24''° N, long 11° 55' 09''E altitudine 147 m), sono di estensione rispettivamente pari a 16.5 ha e 13 ha (Fig. 6). In entrambi i campi, sono presenti dal 2008, due stazioni eddy covariance. Gli appezzamenti hanno una tessitura argillo limosa, per lo strato di suolo da 0-50 cm, (IT-Ro3 sabbia 28.25 %, limo 29.65%, argilla 42.1% e IT-Ro4 sabbia 30.06 %, limo 31.74, argilla 38.2 % USDA, 1999) appartengono alla famiglia dei suoli Eutric-Cambisol secondo la classificazione WRB (World Reference Base for Soil Resources, FAO 2006). Mediamente hanno un contenuto sostanza organica pari a 1.4%, pH 6.4 sub acido, densità apparente pari a 1.05 g cm<sup>-3</sup>. La piovosità media annua del sito sperimentale è pari 750 mm, e la temperatura media annua è pari 15.5 °C (Valori medi 1950-2015, Servizio idrografico e Mareografico del Lazio 2015).



**Figura 6.** Veduta aerea campi sperimentali di Roccarespampani.

### 3.1.1 Descrizione sito sperimentale

La sperimentazione nel sito di Roccarespampani ha avuto luogo a partire dall'anno 2008, ma per il periodo di studio del dottorato i rilievi sono stati eseguiti durante le annate agrarie 2011-2012 e 2012-2013. Nel primo anno di ricerca è stato monitorato il sito IT-Ro4, coltivato con un erbaio autunno-primaverile a trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.). All'interno del campo sono state individuate sette zone di campionamento, secondo lo schema statistico Area Frame Randomised Sampling Method (Stolbovoy et al., 2005), in cui sono stati svolti i rilievi biometrici. Nell'annata agraria 2012-2013, i campi monitorati erano due, entrambi coltivati con erbai autunno-primaverili: nel campo IT-Ro3 era stato seminato un miscuglio avena (*Avena sativa* L.) e veccia (*Vicia sativa* L.), mentre nel campo IT-Ro4, un miscuglio contenente trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.) e loiessa (*Lolium multiflorum* Lam.). Nei due campi erano state individuate quattro zone di campionamento (per un totale di otto) secondo lo schema statistico Area Frame Randomised Sampling Method (Stolbovoy et al., 2005).

### 3.1.2 Itinerari tecnici

La Tab. 2 che riassume in maniera schematica il susseguirsi delle colture nei campi sperimentali dall'inizio della sperimentazione effettuata nel sito. La scelta delle colture è stata effettuata dalla direzione dell'azienda secondo le logiche di mercato ed i fabbisogni dell'allevamento aziendale.

**Tabella .2.** Cicli colturali dei campi sperimentali di Roccarespampani a partire dall'anno 2007.

| Annata Agraria | IT-Ro3 (16.5 ha)    | IT-Ro4 (13 ha)      |
|----------------|---------------------|---------------------|
| 2007-2008      | colza               | colza               |
| 2008-2009      | girasole            | girasole            |
| 2009-2010      | trifoglio incarnato | trifoglio incarnato |
| 2010-2011      | frumento duro       | trifoglio incarnato |
| 2011-2012      | avena-veccia        | trifoglio incarnato |
| 2012-2013      | trifoglio-loietto   | avena-veccia        |

### 3.1.3. Acquisizione dati meteorologici

Durante gli anni della sperimentazione, i dati meteorologici sono stati acquisiti tramite una stazione sita all'interno dell'azienda agricola Roccarespampani (VT), a circa 500 m dai campi sperimentali. La strumentazione presente nello schermo di Stevenson, termografo e pluviografo, registra l'andamento termo-pluviometrico della zona. Tale stazione fa parte della rete di monitoraggio ambientale della Regione Lazio, i dati raccolti dai tecnici della regione sono consultabili in via telematica sul sito [www.idrografico.roma.it/annali](http://www.idrografico.roma.it/annali).

### 3.1.4. Tecnica eddy covariance

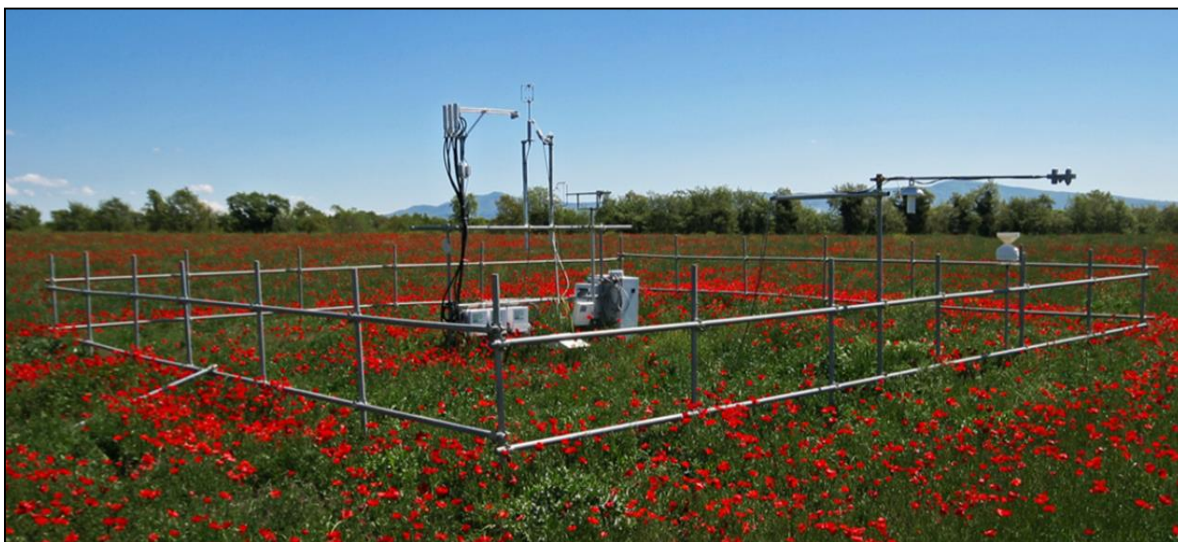
Questa tecnica micrometeorologica viene utilizzata per la stima dei flussi di CO<sub>2</sub> ed acqua tra coltura ed atmosfera e si basa sui principi della fluidodinamica che descrivono i moti turbolenti che si verificano nell'atmosfera terrestre. La tecnica, si basa sul principio della covarianza tra le fluttuazioni rapide della velocità del vento in verticale e le fluttuazioni rapide della concentrazione di gas che si registrano in un determinato ambiente. Per comprendere meglio questo concetto il flusso dell'aria deve essere considerato come un flusso orizzontale di turbini (eddy) che muovono particelle di aria che hanno una velocità, una concentrazione di gas, di umidità ed e temperatura. I sensori adibiti al campionamento individuano la differenza di ognuno di questi elementi tra i vortici che vanno verso l'alto e quelli che vanno verso il basso dunque la quantità di molecole che si muovono verso l'alto e quelle verso il basso misurandone la velocità di spostamento (Fig.7).



**Figura 7.** Moti dei vortici turbolenti, che si registrano tramite la tecnica della eddy covariance.

La tecnica eddy ha avuto una notevole diffusione nel settore scientifico in quanto consente di acquisire i dati in modo rapido e attendibile (Baldocchi, 2003). La strumentazione eddy covariance (EC) è costituita da un anemometro tridimensionale ad ultrasuoni che misura la velocità del vento nelle tre componenti spaziali (x, y, z), dall'analizzatore di gas ad infrarosso, che calcola la CO<sub>2</sub> basandosi sull'assorbimento dell'infrarosso da parte di quest'ultima, da un termometro per la temperatura dell'aria, da una torre di sostegno e da un'unità di acquisizione e memorizzazione dei dati.

Nei siti sperimentali di ricerca, sono presenti due stazioni EC, installate alla fine del 2007 (Fig. 8). Le stazioni sono composte dalle seguenti strumentazioni: un anemometro tridimensionale ultrasonico (Gill Master UK), che misura la velocità e la temperatura del vento nelle tre dimensioni; un analizzatore atmosferico LI 7000 (LiCor USA) che misura la frazione molare dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera e il vapore acqueo; un radiometro tipo HS (Gill Q7 UK) per il calcolo della radiazione netta; un piranometro (SKP 1110, Skye Ltd, UK) che misura la radiazione globale e diffusa; un termo-igrometro (TTU 601) per il monitoraggio della pressione, della temperatura e dell'umidità atmosferica. I flussi di anidride carbonica sono stati registrati alla frequenza di 20 Hz ogni 30 minuti e immagazzinati in un datalogger digitale monitorato settimanalmente dal personale specializzato del dipartimento DISAFRI.

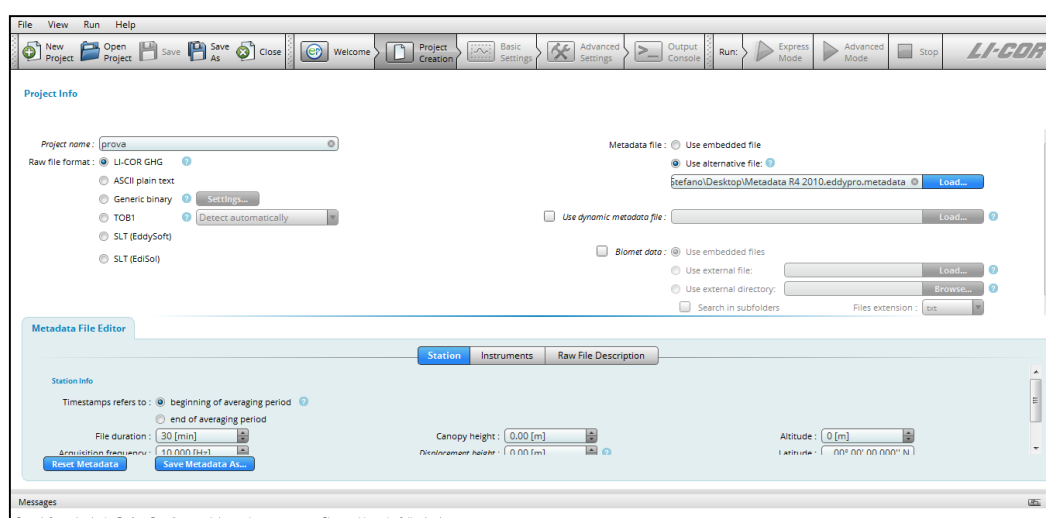


**Figura 8.** Stazione eddy covariance nel campo di ricerca IT-Ro4 Azienda Roccarespampani (VT)

I dati registrati dalla strumentazione EC, sono stati processati con il programma Eddy-Pro 5.0 ([http://www.licor.com/env/products/eddy\\_covariance/software.html](http://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/software.html)).

Eddy Pro 5.0, è un software che permette di analizzare i dati grezzi raccolti dalle stazioni EC messo a punto nel corso degli anni dall'istituto di ricerca IMECC (Infrastructure of Measurements of

European Carbon Sites, 2011) e dalla Li-COR, che lo rende disponibile gratuitamente sul proprio sito ([www.licor.com](http://www.licor.com)). Il procedimento su cui si basa il programma è quello di raccogliere tutte le informazioni necessarie per il corretto processamento dei dati grezzi. I file devono essere caricati e inseriti con tutte le informazioni riguardanti i dati climatici e topografici del sito in fase di studio, dalle schede tecniche della strumentazione della stazione EC (ad es. tipo di anemometro sonico, tipo di radiometro ecc.) l'orientazione di tale strumenti (Footprint). In seguito si individua in base al tipo di analizzatore di gas quale metodo seguire per l'analisi di statistica tramite la finestra di dialogo del software riportata come esempio nella Fig.9. (Aubinet et al., 2000; Papale et al., 2006). I risultati del processamento vengono sottoposti alla tecnica "partitioning" (Papale et al., 2006) per separare la NEE dell'ecosistema, dalla componente di fotosintesi (GPP) e nella componente di respirazione dell'ecosistema (Reco, o TER). Ottenuti i dati dell'analisi di partitioning, viene eseguita la procedura denominata "filtro u-star" che serve a eliminare i dati misurati in condizioni di turbolenza troppo bassa per le stazioni eddy covariance, quindi tutti i periodi di dati mancanti vengono riempiti con una procedura di "gap filling". I dati processati, chiamati di Level-2, vengono ulteriormente elaborati con diverse tecniche di gap-filling, come la MDS (marginal distribution sampling, Reichstein et al., 2005) e la ANN (standard artificial neural network, Moffat et al., 2007) attraverso l'ausilio di script in R (Core Team 2011), per ottenere i risultati finali, chiamati "Level 4" consultabili sul database ICOS-FLUXNET (<http://www.fluxdata.org>). Nel Level-4, sono presenti i flussi di anidride carbonica collezionati da ogni stazione eddy, è da questo dato estratto con il programma Eddy Pro che si ottiene la variabile Net Ecosystem Exchange (NEE) e le altre variabili dell'ecosistema dopo le opportune correzioni e implementazione dei dati grezzi.



**Figura 9.** Interfaccia del programma Eddy pro 5.0 utilizzata dall'utente per l'inserimento degli input row per il processamento dati.

Le procedure di gap filling utilizzate si basano sull'impiego delle reti neurali (ANN, artificial neural network) (Moffat et al., 2007) oppure marginal distribution sampling (MDS) (Reichstein et al., 2005). Terminata la fase di gap filling, i dati vengono elaborati in un formato standard, denominato Level-4, I dati in formato Level-4 delle due stazioni IT-Ro3 e IT-Ro4 sono consultabili sul database [www.europe-fluxdata.eu](http://www.europe-fluxdata.eu).

### **3.1.5. Rilievi effettuati sulle colture**

#### *3.1.5.1. Rilievi sulla biomassa epigea*

Nel corso delle annate agrarie a cadenza bisettimanale, sono stati effettuati campionamenti di biomassa epigea ed a fine ciclo è stata effettuata la raccolta dei residui colturali. Le misure effettuate nelle zone campioni identificate nel disegno sperimentale, sono state fatte su un'area di 0.9 m<sup>2</sup>, utilizzando un quadrato ed effettuando il taglio delle piante all'altezza del colletto. La biomassa è stata essiccata in stufa a ventilazione forzata, alla temperatura di 80°C per tre giorni allo scopo di poter eliminare il contenuto di acqua e facilitare la lettura dell'analizzatore elementare per l'individuazione del carbonio e dell'azoto nella sostanza secca. In ogni data di campionamento della biomassa epigea, è stata misurata l'altezza delle piante con un metro, dal colletto alla parte apicale. Dal campione di biomassa raccolto nel quadrato di rilievo (0.9 m<sup>2</sup>) sono stati prelevati dei sub-campioni di biomassa, utilizzati per il calcolo del LAI tramite metodo diretto (Area Meter Li-3100, LI-COR Lincoln, Nebraska USA, Fig.10). Il procedimento di misura su cui si basa lo strumento è quello di far passare le foglie del campione elementare, precedentemente raccolto in campo, su una serie di nastri trasportatori che indirizzano le foglie su una luce fluorescente da 15 watt. L'immagine viene riflessa da tre specchi che poi la proiettano nella fotocamera a scansione, la quale misura l'ampiezza dell'area registrata dal rilievo della frequenza della corrente elettrica e dalla velocità della cinghia.



**Figura 10.** Area meter Li-3100, utilizzato per il calcolo diretto del LAI

Nel corso della sperimentazione, sono state effettuate misure della frazione di radiazione fotosinteticamente attiva (400-700 nm) assorbita dalla coltura (fPAR) tramite il ceptometro Sunscan SS1-UM 2.0 (Fig.11) (Delta-T Devices, United Kingdom). Lo strumento è formato da una barra lunga 1 metro, nella quale sono presenti 64 fotodiodi. Sono stati effettuati 4 rilievi il primo anno e 11 rilievi il secondo anno. Lo schema di campionamento comprendeva una serie di 20 misure, fatte sopra la vegetazione (mediamente 10, 5 a inizio e 5 a fine rilievo) e sotto la vegetazione. (5 orizzontalmente e 5 ortogonalmente alla direzione del sole) seguendo la metodologia di campionamento di Hipps (Hipps et al.1983) nelle zone precedentemente individuate. La radiazione assorbita dalla coltura (fPAR) è stata calcolata secondo la seguente equazione:

$$fPAR = \frac{APAR}{PAR} = \frac{I_o - T_c - R_{cs} + R_s}{I_o} \quad (5)$$

Dove:

$I_o$  = Radiazione Incidente

$T_c$  = Radiazione trasmessa dalla vegetazione

$R_{cs}$  = Radiazione riflessa dalla vegetazione e dal suolo

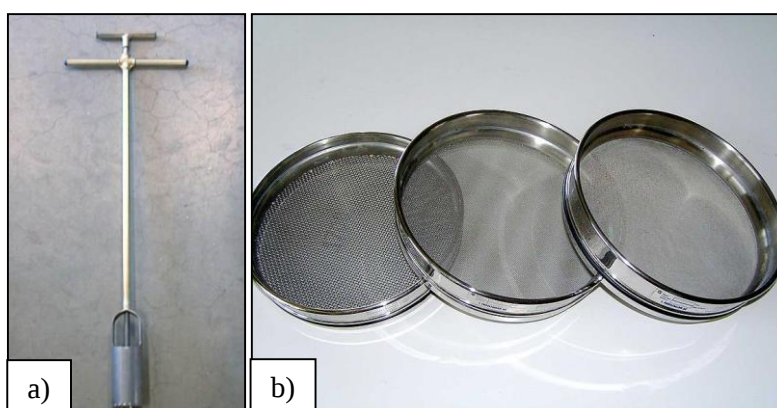
$R_s$  = Radiazione riflessa dal suolo



**Figura 11.** *Strumento Sunscan utilizzato per i rilievi della radiazione PAR assorbita dalla vegetazione.*

### 3.1.5.2. Rilievi sulla biomassa ipogea

I campionamenti della biomassa epigea, sono stati effettuati ogni annata agraria al momento della fioritura delle colture. Le radici sono state raccolte in prossimità delle aree di rilievo, prelevandole con un carotatore manuale conico, tipo Eijkelkamp (Fig.12a). Seguendo uno schema a L sono stati effettuati tre rilievi lungo la fila della coltura e tre rilievi nell'interfila, per intervalli (carote) di 15 cm, fino alla profondità massima di 45 cm, in modo tale da poter raccogliere la maggior parte della biomassa radicale. In seguito i campioni sono stati essiccati all'aria per una settimana, setacciati a 2 mm con setacciatore a maglie metalliche in acciaio (Retsch, Alanysesieb, Germany, Fig. 12b) per eliminare le impurità grossolane, mentre la seconda setacciatura è stata fatta a 0.02 mm tramite acqua corrente per eliminare i residui di terreno e separare le radici più piccole. I campioni di radici vegetali una volta identificati e pesati sono stati messi in stufa a 80°C per tre giorni per determinare il peso della sostanza secca.



**Figura 12. a)** *Carotatore conico con manovella distribuito da Eijkelkamp* **b)** *Setacciatori a maglie in acciaio tipo Retsch*

### 3.1.5.3 Analisi del contenuto di C e N

La determinazione del carbonio e dell'azoto nella biomassa vegetale raccolta durante le diverse stagioni colturali, è stata effettuata con l'analizzatore elementare Flash EA1112 (Thermo Electron Corporation Usa Fig.13b). La biomassa, dopo essere stata precedentemente essiccata in forno a 80°C per tre giorni, è stata sminuzzata tramite un mulinello elettrico e ulteriormente polverizzata con lo strumento Fritsch Pulverisette23 (Fig.13a) per facilitare l'azione di campionamento della Flash combustion all'interno dell'analizzatore elementare. Il procedimento delle analisi prevede la pesatura del campione con bilancia di precisione (circa 10 milligrammi di biomassa) e il suo confezionamento in capsule di alluminio, per essere poi inserite nell'autocampionatore dell'analizzatore elementare. Lo strumento prevede una combustione rapida e completa del campione all'interno del forno a circa 950°, i gas della combustione vengono fatti passare in corrente d'elio ad una secondo forno a circa 850°C per completare l'ossidazione. Successivamente la miscela gassosa viene separata per gascromatografia ed i gas vengono rilevati da un detector. Lo strumento permette così di determinare il carbonio e l'azoto dalle biomasse vegetali (o del suolo).



**Figura 13. a) Polverizzatore Fritsch b) Analizzatore elementare FlashEA1112.**

### 3.1.6. Rilievi effettuati sul suolo

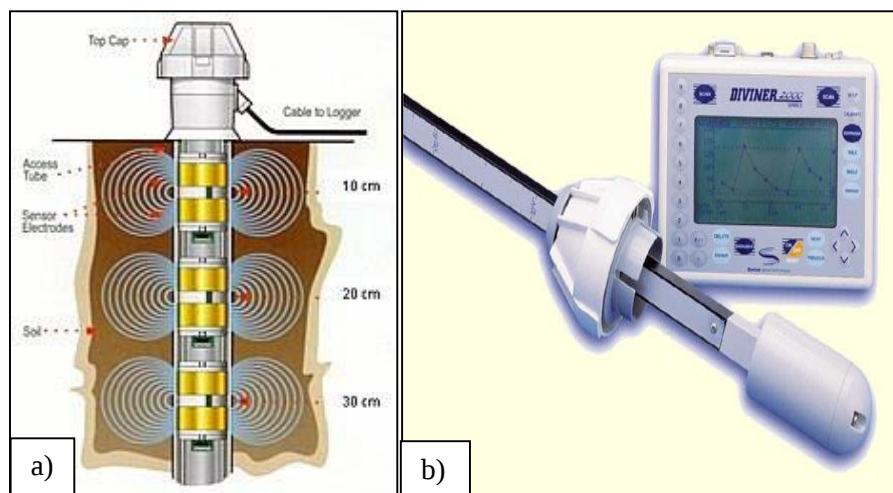
I siti sperimentali sono stati studiati e monitorati a partire dal 2007 fino al 2013. In ogni annata agraria sono state effettuate diverse analisi fisico-chimiche del terreno, seguendo lo schema sperimentale area frame randomised che veniva determinato di anno in anno nei siti di ricerca. Le analisi effettuate sono state le seguenti: monitoraggio del contenuto idrico, misurazione del pH nella soluzione circolante, densità apparente, contenuto di carbonio organico e relativa percentuale di sostanza organica, contenuto di azoto totale e dei nitrati. Le metodiche utilizzate hanno seguito i protocolli ufficiali sui metodi di analisi (D.M n°79 del 11/05/1992 e D.M n°185 del 13/09/1999). La Tab.3 fornisce una guida rapida sulle principali analisi di rilievo che sono state effettuate sui siti sperimentali durante la ricerca di dottorato e precedentemente dal personale del dipartimento DAFNE.

**Tabella 3.** Cronogramma dei principali rilievi effettuati sul suolo nei campi sperimentali con riferimento alla data di campionamento e coltura erbacea.

| Sito<br>Ricerca | Coltura                         | Data       | Cronogramma Rilievi sul suolo                               |
|-----------------|---------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| IT-RO3          | Frumento<br>duro                | 19/08/2010 | Densità apparente inizio ciclo 0-40 cm                      |
|                 |                                 | 19/08/2010 | Rilievo sostanza organica inizio ciclo profondità 0-80 cm   |
| IT-RO4          | Trifoglio<br>incarnato          | 12/06/2012 | Campioni sostanza organica fine ciclo profondità 0-50 cm    |
|                 |                                 | 20/07/2012 | Densità apparente fine ciclo profondità 0-45 cm             |
|                 |                                 | 11/09/2012 | Campioni sostanza organica inizio ciclo 0-50 cm             |
|                 |                                 | 11/12/2012 | Densità apparente inizio ciclo 0-45 cm                      |
| IT-RO3          | Erbaio<br>Trifoglio-<br>Loietto | 13/12/2012 | Rilievo nitrati inizio ciclo 0-50 cm                        |
|                 |                                 | 05/06/2013 | Rilievi nitrati fine ciclo 0-50 cm                          |
|                 |                                 | 06/06/2013 | Rilievi sostanza organica fine ciclo e Azoto totale 0-50 cm |
|                 |                                 | 20/08/2013 | Densità apparente fine ciclo 0-45 cm                        |
|                 |                                 | 11/09/2012 | Campioni sostanza organica inizio ciclo 0-50 cm             |
|                 |                                 | 22/11/2012 | Densità apparente inizio ciclo e rilievo pH 0-50 cm         |
| IT-RO4          | Erbaio<br>Avena-<br>Veccia      | 13/12/2012 | Rilievi nitrati inizio ciclo 0-50 cm                        |
|                 |                                 | 05/06/2013 | Rilievi nitrati fine ciclo 0-50 cm                          |
|                 |                                 | 06/06/2013 | Rilievi sostanza organica fine ciclo e Azoto totale 0-50 cm |
|                 |                                 | 05/07/2013 | Densità apparente fine ciclo 0-40 cm                        |

### 3.1.6.1. Rilievi di umidità del suolo

Durante le stagioni colturali, l'umidità del suolo dei siti è stata monitorata in continuo in un punto per ciascun campo, tramite due sonde ENVIRO SCAN SOLO (Sentek, Australia) che registravano il contenuto idrico nel suolo ad intervalli di 30 minuti, alle profondità di 10 cm, 20 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm (Fig.14a) in un datalogger, che veniva scaricato con la chiave SOLO PORTER a cadenza settimanale. Inoltre durante i rilievi settimanali delle sonde SCAN SOLO, veniva monitorata l'umidità del suolo attraverso la sonda DIVINER 2000 (Fig.14b), azionata manualmente all'interno di pozzetti in PVC installati nei campi sperimentali (sette il primo anno, sei nel secondo anno), ad intervalli di 10 cm fino alla profondità di 70 cm. Tutti i sensori utilizzati per il rilievo dell'umidità nel terreno si basano sul metodo Frequency-Domain –Reflectometry (FRD). Il principio fisico di tale metodo comprende due sensori metallici paralleli, i quali emettono degli impulsi elettrici a intervalli che vanno a 150 a 500 MHz. Tali metodi si basano sulle proprietà dielettriche del suolo e le caratteristiche di propagazione delle onde elettromagnetiche (EM) nel terreno, che cambiano con variare del contenuto di salinità (Skierucha et al., 2010).



**Figura 14. a) Sonda Enviro Scan e b) Diviner 2000 per il monitoraggio dell'umidità nel suolo.**

### 3.1.6.2. Densità apparente

Il campionamento della densità apparente è stato effettuato all'inizio e alla fine di ogni ciclo colturale, alle profondità 0-15 cm, 15-30 cm e 30-45 cm secondo la metodologia del cono a sabbia (Patrino et al., 1998). Il metodo consiste nello scavo di una sezione di terreno, a una profondità nota (nel nostro caso 15 cm tramite carotatore conico distribuito dall'azienda Eijelkamp, Fig.15b). Lo scavo viene riempito con sabbia (diametro particelle comprese tra 500 e 700  $\mu\text{m}$ , e massa volumica pari 1.405  $\text{g cm}^{-3}$ ) tramite l'ausilio dello strumento cono e del piatto di lavorazione (Fig.15a). In seguito la porzione di terreno escavata con il carotatore viene portata in laboratorio, messa in stufa a 105°C per tre giorni e successivamente viene pesato il terreno secco per determinare la densità apparente con la seguente equazione (6)

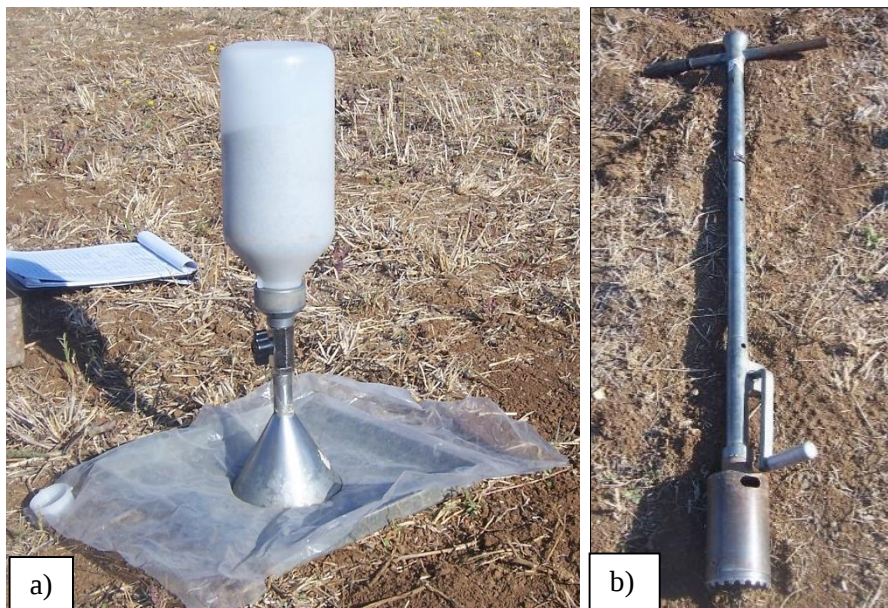
$$\rho = \frac{M_t}{V_s} \quad (6)$$

Dove:

$\rho$  = Massa volumica apparente o Densità apparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$M_t$  = Massa del terreno essiccato a 105°C, espressa in g

$V_s$  = Volume della sabbia nella sezione di scavo, espressa in  $\text{cm}^3$



**Figura 15. a)** Kit cono a sabbia per la misura della densità apparente **b)** carotatore conico distribuito da Eijelkamp

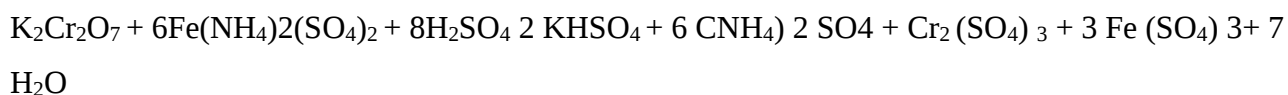
### 3.1.6.3. Misura pH del suolo

Il pH della soluzione del suolo è stato determinato tramite l'analisi dei campioni prelevati nei punti di campionamento determinati nello schema di campo area frame randomised (paragrafo 3.1, Fig.6) con sgorbia a coclea, ad intervalli di 10 cm fino alla profondità di 50 cm. La scelta della profondità è in funzione allo stato di terreno interessato dalle colture erbacee nella funzione di nutrizione e ancoraggio. Il campione di terreno è stato essiccato all'aria, setacciato con setaccio Retsch a maglie di 2 mm, messo in provette di vetro, aggiungendo acqua deionizzata con rapporto 1:2.5. Con una bacchetta di vetro si è maneggiato il tutto, in seguito si è chiusa la provetta messa in agitazione per 15 minuti su agitatore meccanico. Il campione è stato lasciato riposare per 30 minuti dopo l'agitazione. Fatto tutto si è proceduto con le misure tramite pH-metro (modello 720A Orion) precedentemente calibrato con le soluzioni tampone a tre punti (4.01 pH acido, 7.0 pH neutro, 10.01 pH basico) semplicemente immergendo l'elettrodo di vetro nella provetta contenente il campione da misurare, ripetendo la misura almeno tre volte.

### 3.1.6.4. Analisi del carbonio organico

La determinazione della sostanza organica nel profilo di suolo 0-50 cm è stata effettuata secondo il metodo a freddo Walkey and Black (Sequi e De Nobile, 2000). Tale metodo si basa sul dosaggio del contenuto di carbonio, ottenuto per ossidazione con bicromato di potassio e dell'acido solforico. Questa reazione di ossidazione viene poi bloccata con l'aggiunta di acqua distillata dopo 30 minuti. La titolazione della soluzione così ottenuta con la soluzione di ferro ammonio solfato (comunemente chiamato Sale di Mohr) permette di conoscere la quantità di sostanza organica presente nel campione.

La reazione chimica è la seguente:



Nella reazione sopra riportata si nota come il cromo (Cr) si riduce passando da un numero di ossidazione di +6 a +3, acquistando quindi 3 elettroni; il ferro (Fe) invece, subisce un'ossidazione, passando da +2 a +3. Ad inizio e fine ciclo colturale sono stati raccolti i campioni di terreno per le analisi, tramite sgorbia conica, ad intervalli di 10 cm nei punti indicati per i campionamenti delle

variabili colturali, fino alla profondità di 50 cm. I campioni una volta essiccati in ambiente asciutto e ventilato per una settimana, sono stati omogeneizzati in un mortaio e setacciati a 2 mm. Un aliquota di suolo setacciato, pari a 1 g viene messo in una beuta, pronta per il procedimento dell'analisi. Nella beuta con il campione sono stati aggiunti 10 ml di potassio bicromato e 20 ml di acido solforico concentrato. Si è coperta la beuta con un coperchio di vetro e la si è lasciata riposare per trenta minuti esatti, alla fine dei quali si è interrotta la reazione con l'aggiunta di 200 ml di acqua distillata precedentemente messa in frigorifero alla temperatura di 4°C per una notte. Fatto ciò sono stati aggiunti alla soluzione 5 ml di acido fosforico concentrato e circa 1 ml di indicatore ossiredox (ferroina). Poi, mantenendo in costante agitazione la beuta tramite il titolatore automatico, Triton matic (Crison, Spain), viene titolato il campione con il sale di Mohr 0,5 molare (ferro ammonio solfato) fino al raggiungimento del punto di viraggio, da verde scuro a rosso intenso. Questa procedura si è ripetuta per i campioni di terreno e per la prova in bianco, annotando per ciascuna delle tre prove il volume di soluzione titolante consumato, al fine di ottenere, attraverso i calcoli delle equazioni, la quantità di sostanza organica e di carbonio presente nel terreno seguendo le seguenti equazioni:

$$C = 3,9 * \frac{(B-A)}{m * MFe} \quad (7)$$

Dove:

C = contenuto di carbonio organico, espresso in g kg<sup>-1</sup>

3,9 = coefficiente di conversione rapporto molare della reazione di ossidoriduzione

B = volume della soluzione di ferro (II) solfato utilizzato nella titolazione della prova in bianco, espresso in millilitri

A = volume della soluzione di ferro (II) solfato utilizzato nella titolazione della soluzione del campione, espresso in millilitri

M Fe = molarità effettiva della soluzione di ferro (II) solfato

m = massa del campione di terra fine, espressa in grammi

Il risultato ottenuto tramite il procedimento descritto è utilizzato per il calcolo della sostanza organica presente nel nostro sito di ricerca attribuendo il fattore di conversione (58% contenuto di carbonio nella sostanza organica).

$$S.O = C * 1,724 \quad (8)$$

### 3.1.6.5. Analisi dell'azoto totale e dell'azoto nitrico del suolo

Per avere un quadro conoscitivo generale della situazione del contenuto di azoto nel terreno nei siti di ricerca, si sono prelevati, ad inizio e fine di ciascun ciclo colturale, campioni di terreno a intervalli di 10 cm, fino alla profondità di 50 cm, con una sgorbia a coclea prodotta dall'azienda olandese Eijelkamp. Successivamente si è proceduto con l'analisi tramite il metodo Kjeldhal (Fig.16a). La determinazione dell'azoto totale col metodo Kjeldhal (SISS,1985) consiste nel sottoporre il campione da analizzare ad una serie di trasformazioni che iniziano con la fase di digestione, in questa fase si mineralizza tutto l'azoto contenuto nel campione. Il procedimento consiste nel pesare circa 3 grammi di suolo, precedentemente setacciato a 0.2 mm, si inseriscono nella provetta di vetro pirex, resistente alle alte temperature, si aggiungono 20 ml di acido solforico e il catalizzatore costituito da una pastiglia di solfato di potassio e selenio. Il tutto si lascia sotto cappa nelle piastre riscaldanti alla temperatura di 600°C, per circa un'ora. Durante questo tempo viene mineralizzato l'azoto presente nel campione sotto forma di solfato d'ammonio. Si interrompe il riscaldamento quando il contenuto della provetta è limpido e di colorazione giallo-verdastra, si lascia raffreddare e si aggiungono circa 20 ml di acqua distillata. La seconda fase prevede la distillazione del campione, si introduce la provetta pirex nell'alloggiamento del distillatore (Fig.16b) e si aggiungono circa 30 ml di idrossido di sodio e avviene la seguente reazione rilasciando ammoniaca che rimane nella provetta.

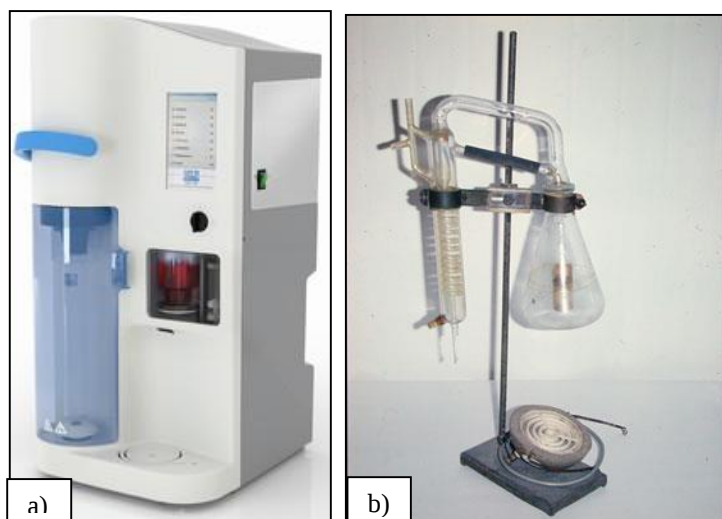


Successivamente si fissa l'ammoniaca sviluppata dalla reazione in idrossido d'ammonio con l'aggiunta di una corrente di vapore con la seguente reazione:



L'idrossido d'ammonio, si ricondensa nel refrigerante e viene raccolto alla fine del ciclo di distillazione in una beuta, contenente 50 ml di acido solforico e l'indicatore metilarancio. Si raccolgono circa 100 ml di distillato e si titola l'eccesso di acido con una soluzione di idrossido di sodio, fino al viraggio dell'indicatore da rosso arancio al giallo paglierino. Il calcolo dell'azoto totale si esprime in g kg<sup>-1</sup> e si calcola secondo la seguente equazione:

$$N \text{ ToT } g \text{ kg}^{-1} = \frac{0.5 * 100 * ml}{g * 1000} \quad (11)$$



**Figura 16. a)** *Analizzatore Kjeldhal* **b)** *matraccio tarato per la titolazione del campione tramite idrossido di sodio.*

Per la determinazione dei nitrati nel suolo i campioni, raccolti come precedentemente descritto per le altre determinazioni, sono stati congelati a circa  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  immediatamente dopo il prelievo. E' stato utilizzato un metodo di analisi spettrofotometrico, comprendente l'uso del salicilato di sodio (Cataldo et al., 1975). Tale metodo prevede la preparazione di diverse concentrazioni di nitrato di potassio a 1ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml ed anche una beuta in "bianco" con solo acqua deionizzata. Questi campioni sono utilizzati per costruire la retta di taratura dello spettrofotometro. Una volta effettuato il procedimento per la taratura dello strumento, si è passati all'analisi dei nitrati presenti nel suolo. I campioni sono stati scongelati 24 ore prima dell'analisi e mantenuti in frigo per evitare perdite di azoto dovute al calore e alla evaporazione. Si sono prelevati alcuni grammi di terreno, inseriti in una beuta, con aggiunta di 5 ml di acido cloridrico, si è aspettato 30 minuti per poi filtrare il campione di terreno tramite carta Whatman 40. Il liquido ottenuto tramite la filtrazione del campione di terreno originale viene centrifugato a 4000 giri per 15 minuti (Centrifuga ALL 4218) terminata la centrifugazione si è prelevato il surnatante inserendolo in una nuova provetta e aggiungendo 10 ml idrossido di sodio. Dopo tale procedimento si è effettuata la determinazione della concentrazione dei nitrati tramite lo spettrofotometro Shimadzu UV-VIS mini 1240 (Fig.17) usando cuvette di vetro per la lettura dell'assorbanza. Il metodo spettrofotometrico determina i nitrati tramite la reazione che si instaura tra il salicilato di sodio e i nitrati presenti nel campione analizzato, che reagendo formano un composto (il paranitrosalicilato di sodio) di colore giallo il cui spettro di assorbimento presenta un picco a 420 nm.



**Figura 17.** Spettrofotometro utilizzato per la determinazione del contenuto di nitrati nel suolo.

#### 3.1.6.6. Misure ancillari respirazione del suolo

Durante l'annata agraria 2012-2013, sono stati monitorati i flussi di anidride carbonica con misurazioni ancillari al suolo. Questo procedimento è stato adottato per avere maggiori informazioni nel calcolo del bilancio del carbonio nell'agroecosistema. Le misure sono state effettuate durante il periodo febbraio-giugno 2013 con intervallo di tempo di circa 10 giorni, attraverso l'utilizzo dell'analizzatore di gas EGM-4 (PP Systems UK) per un totale di undici rilevati. Lo strumento è formato da un computer datalogger portatile, da un termometro e dalla camera riscaldata di diametro 10 cm e altezza 15 cm, adibita al rilievo del flusso di anidride carbonica (Fig.18). La misura si basa sul principio della spettrofotometria IR (Auble and Meyers, 1992) che prevede l'assorbimento di luce infrarossa da parte del gas da analizzare (in questo caso anidride carbonica). Il flusso viene rilevato attraverso il posizionamento della camera riscaldata sulla postazione (cilindro in PVC) inserito per circa 10 cm nel suolo, precedentemente installato all'inizio del ciclo colturale. Lo strumento registra in circa 3 minuti il flusso di carbonio espresso in  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ .



**Figura 18.** Strumentazione PP-System per la registrazione del flusso di carbonio nel terreno.

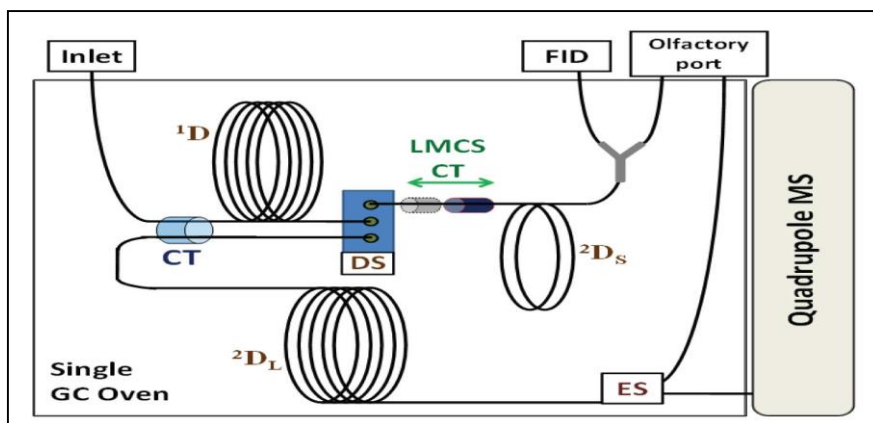
### 3.1.6.7. Misura del protossido di azoto

Per quanto riguarda il flusso di protossido di azoto ( $N_2O$ ) nei suoli agrari, è stato rilevato secondo la metodologia delle camere mobili (Hutchinson and Livingstone 1993), utilizzando 18 postazioni (9 per campo sperimentale) installate al momento della misurazione. Le misure sono state effettuate durante il periodo febbraio-giugno 2013 a cadenza bisettimanale per un totale di sei date di rilievo. Tale metodo consiste nell'inserimento nel terreno di collari in PVC, adibite al posizionamento delle camere mobili, al momento della misura. Le camere sono munite di rubinetti a tre vie (three way stop cock). Il rilievo viene effettuato prelevando un campione d'aria attraverso una siringa (Fig.19) ad intervalli di tempo regolari, di solito ogni trenta minuti, per un totale di tre misurazioni (Tempo 0, Tempo 1, Tempo 2). Il campione d'aria prelevato viene immagazzinato in vials di vetro da 20 ml di volume, chiuse con colla liquida e successivamente analizzate mediante gascromatografia. Al momento del rilievo sono state misurate anche la temperatura e l'umidità del suolo con strumentazione da campo (Tetra probe termometro e Diviner 2000).



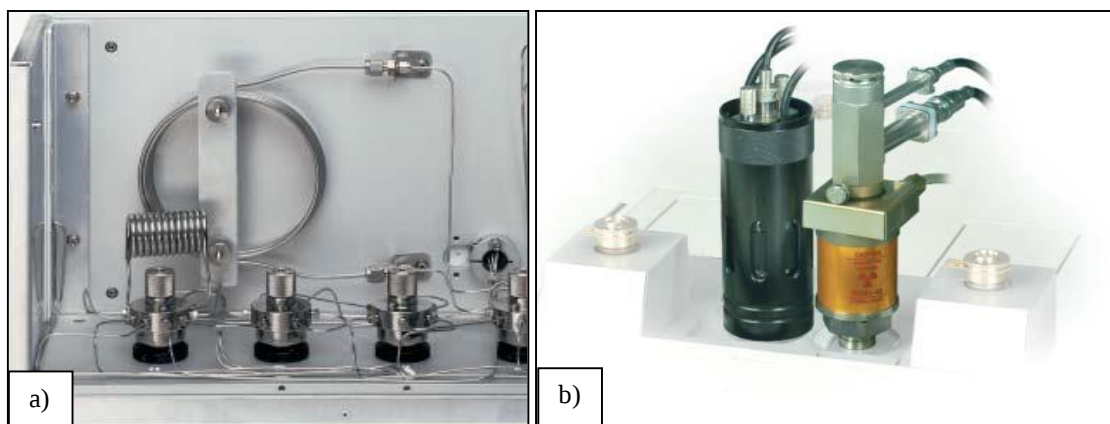
**Figura 19.** *Rilievo del protossido di azoto con il metodo delle camere mobili*

Per determinare la concentrazione del protossido di azoto nell'aria raccolta nelle vials, è stato utilizzato il Gas-cromatografo (Finnigan TRACE GC Ultra). La Fig.20 illustra il funzionamento dell'apparecchiatura.



**Figura 20.** Schema semplificato del funzionamento del Gascromatografo

Il campione gassoso da analizzare contenuto in una vial, viene iniettato tramite le serpentine di input denominate “loop” (Fig.21a) all’interno del gascromatografo. Qui il campione d’aria viene trasferito nel cuore del macchinario, dove il forno, ad una temperatura di circa 300°C ,brucia il campione di aria, insufflato dal loop con i gas carrier (argon-metano), per poi essere analizzato dal detector FID (Fig.21b) determinando il contenuto del gas protossido di azoto (durata del processo 15 minuti ).Durante la combustione del campione il detector FID (Flame ionisation dector) trasferisce gli impulsi analizzati ,al programma Cromo Card (termo-finnigan 2000) del gascromatografo, che riporta in maniera grafica l’area del protossido d’azoto registrato nel campione. Il contenuto di protossido di azoto e determinato in parti per bilione (ppb) tramite correlazioni con le aree prodotte dai gas di calibrazione e il contenuto analizzato. Il probe FID è un rivelatore che si basa sulle capacità di ionizzazione delle sostanze uscenti dal loop del gascromatografo e la microfiamma alimentata da H<sub>2</sub> e aria purissima (bombola) come comburente. Tra il microbruciatore e un conduttore cilindrico posto al di sopra della fiamma è applicata una tensione di circa 300 V.



**Figura 21. a)** Serpentine Loop di iniezione **b)** Detector del GC

### 3.2. Applicazione del modello DNDC per le simulazione dei flussi di C nella Provincia di Viterbo

L'obiettivo delle simulazioni con il modello DNDC a livello di sito è quello di testare la capacità di tale modello di simulare il flusso di NEE, confrontando l'accuratezza dell'output della simulazione con i dati misurati in campo dalle stazioni eddy covariance. Questo studio preliminare serve a capire le potenzialità del modello per l'applicazione a livello regionale della simulazione spaziale del flusso di NEE per le colture di frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.).

#### 3.2.1. Simulazioni a livello di sito

Le simulazione effettuate a livello di sito con il modello, hanno riguardato un periodo di 10 anni per entrambi gli appezzamenti (IT Ro3, IT-Ro4) con riferimento temporale 1 Gennaio 2003- 31 Dicembre 2013 (Tab. 4). I dati di input del modello di simulazione come la tessitura, la densità apparente e il contenuto di sostanza organica del suolo sono stati scelti e inseriti in base ai dati raccolti nel corso delle annate agrarie che si sono susseguite nei campi sperimentali, come anche i dati biometrici delle colture (rapporto C/N produzione di granella) riportate nella Tab.5. Gli input climatici giornalieri sono stati registrati dalla stazione meteorologica situata in prossimità del sito, facente parte delle rete di monitoraggio climatico del Servizio idrografico e Mareografico del Lazio ([www.idrografico.roma.it](http://www.idrografico.roma.it)).

**Tabella 4.** Parametri climatici e pedologici inseriti nelle simulazioni a livello di sito nei due campi di ricerca

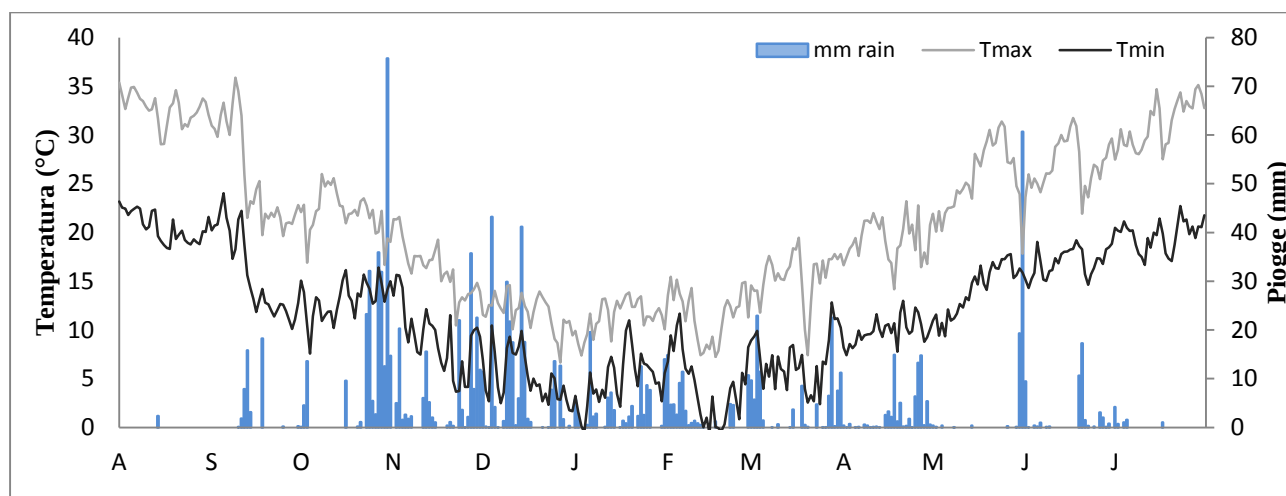
| DNDC Parametri                            | IT-Ro3                    | IT-Ro4                    |
|-------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Altitudine (m)                            | 147                       | 145                       |
| Latitudine                                | 42.37° N                  | 42.37° N                  |
| Longitudine                               | 11.92° E                  | 11.91° E                  |
| Temperatura Media °C                      | 15.5                      | 15.5                      |
| Precipitazioni annuali (mm media 10 anni) | 750                       | 750                       |
| Tipo di suolo                             | Eutric-Cambisol           | Eutric-Cambisol           |
| Classificazione di suolo DNDC             | Upland crop Sandy- Clay   | Upland crop Sandy- Clay   |
| Contenuto sostanza organica (0-50 cm)     | 7.99 g C kg <sup>-1</sup> | 8.99 g C kg <sup>-1</sup> |
| pH                                        | 7                         | 7                         |
| Rapporto C/N nel suolo                    | 9                         | 9                         |
| Sabbia/Limo/Argilla (%)                   | 30/28/42                  | 31/30/38                  |
| Percentuali in volume di spazi vuoti (%)  | 42.6                      | 45.1                      |
| Densità apparente (g cm <sup>-3</sup> )   | 1.1                       | 1.1                       |

**Tabella 5.** Input biometrici utilizzati nel periodo 2003-2012 per le simulazioni a livello di sito

| Coltura             | Anno di semina | TDD (°C) | Temperatura Ottimale di crescita (°C) | Produzione (kg C ha <sup>-1</sup> ) | C:N Seme | C:N Foglie | C:N Steli | C:N Radici |
|---------------------|----------------|----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------|------------|-----------|------------|
| Trifoglio incarnato | 2003           | 2200     | 21                                    | 200                                 | 33       | 35         | 35        | 80         |
| Frumento duro       | 2004           | 1700     | 20                                    | 2200                                | 45       | 55         | 55        | 100        |
| Trifoglio incarnato | 2005           | 2200     | 21                                    | 200                                 | 33       | 35         | 35        | 80         |
| Frumento duro       | 2006           | 1700     | 20                                    | 2200                                | 45       | 55         | 55        | 100        |
| Trifoglio incarnato | 2007           | 2200     | 21                                    | 200                                 | 33       | 35         | 35        | 80         |
| Colza               | 2008           | 3000     | 25                                    | 4500                                | 45       | 75         | 75        | 100        |
| Girasole            | 2009           | 1500     | 28                                    | 2000                                | 25       | 35         | 35        | 80         |
| Trifoglio incarnato | 2010           | 2200     | 21                                    | 200                                 | 33       | 35         | 35        | 80         |
| Frumento duro       | 2011           | 1700     | 20                                    | 2200                                | 45       | 55         | 55        | 100        |
| Trifoglio incarnato | 2012           | 2200     | 21                                    | 200                                 | 33       | 35         | 35        | 80         |

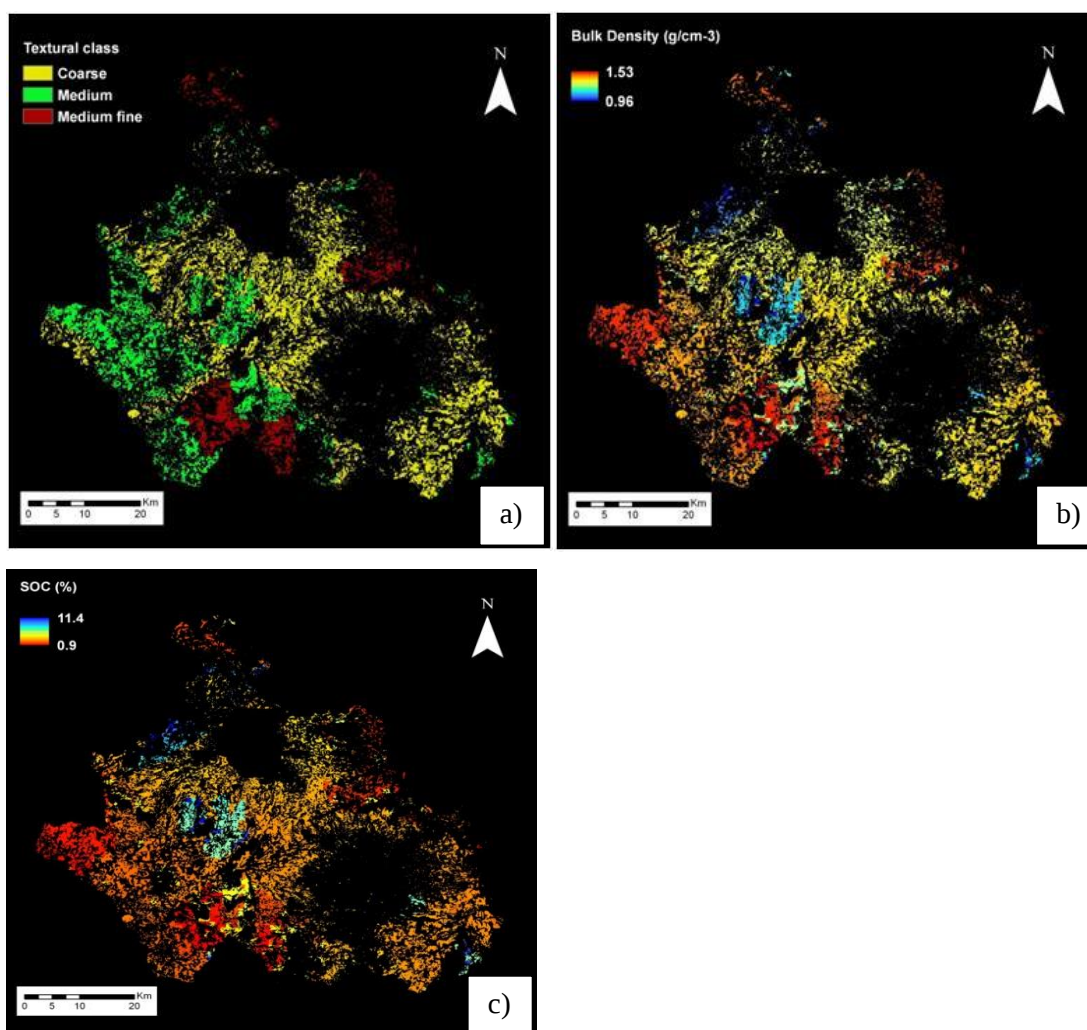
### 3.2.2. Simulazioni a livello regionale

Le simulazioni a livello regionale sono state eseguite con il modello di simulazione DNDC 9.5 tramite la modalità batch site, pixel per pixel, come raccomandato da Pearlman et al., (2013). I dati climatici di input per la simulazione regionale (Fig. 22) sono stati estratti dal dataset assemblato durante il progetto di ricerca GHG Europe ([www.ghg-europe.eu](http://www.ghg-europe.eu)), derivante dall'armonizzazione e downscaling dei dataset WATCH and ERA Interim, con una risoluzione pari a 0.25° gradi (Beer et al., 2014). L'accesso dei dati meteorologici durante la simulazione è stata implementata tramite uno script in R 3.0.2 (Core team 2011), che selezionava i dati climatici giornalieri in base alla posizione del pixel simulato sulla griglia provinciale (grid 50 m) e i dati estratti dai dataset precedentemente descritti. La simulazione è stata fatta per il periodo di tempo che va dal 1 Agosto 2008 al 31 Luglio 2009.



**Figura 22.** Dati climatici di input utilizzati per la simulazione regionale, estratti dai dataset Watch and Era Interim (Beer et al., 2014), Temperature media e massima giornaliera dell'aria (°C) e piogge (mm) per il periodo 1 Agosto 2008-31 Luglio 2009 registrate nella Provincia di Viterbo.

La temperatura media massima registrata nel periodo 1 Agosto 2008-31 Luglio 2009 è stata pari a  $20.9 \pm 7.8$  °C, la temperatura media minima pari a  $11.8 \pm 6.2$  °C mentre la somma delle piogge pari a  $1225.1 \pm 8.3$  mm. Gli input delle caratteristiche del suolo per la simulazione regionale sono stati estratti dal European Soil Database Project Spade 2 (Hannam et al., 2009), la Fig. 23 illustra le mappe che sono state ottenute dal dataset.



**Figura 23.** Mappe delle caratteristiche fisico-chimiche del suolo utilizzate come input nella simulazione regionale con DNDC. **a)** tessitura del suolo **b)** densità apparente **c)** contenuto in % della sostanza organica.

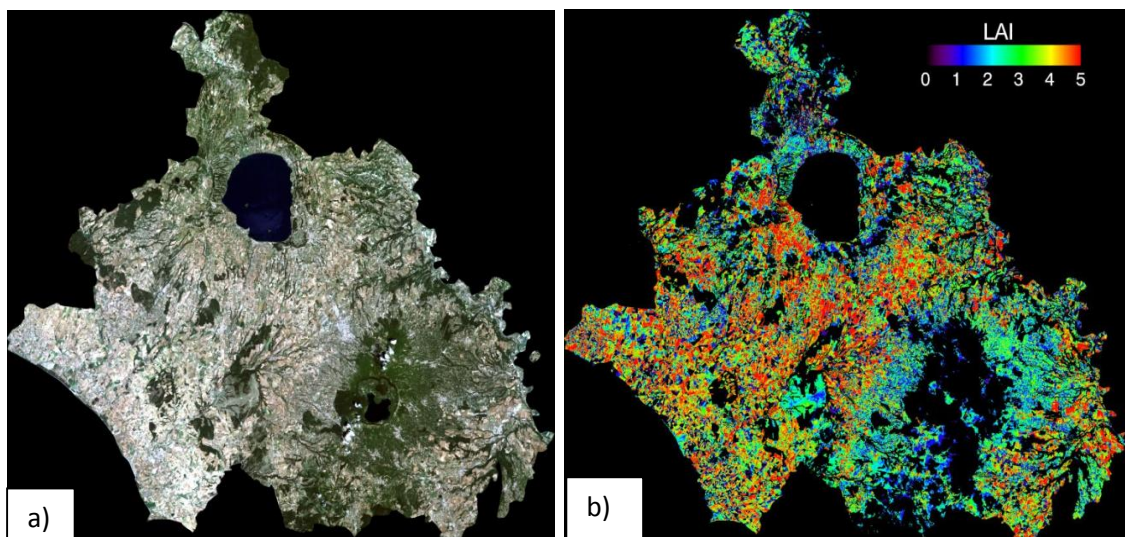
La Fig. 23a, mostra come nell'area della Provincia di Viterbo sono stati estratti tre tipologie di tessitura secondo la classificazione USDA (USDA, 1999) che corrispondono alle seguenti classi vale a dire: 1) franco-sabbiosa (argilla  $\leq 18\%$ , sabbia  $> 65\%$ ), 2) franco (riferimento ad un contenuto di

argilla compresa tra  $\leq 18\%$  e  $< 35\%$  , oppure sabbia compresa tra 15-65% e inoltre alcuni terreni presentano in questa categoria possiedono un contenuto di sabbia maggiore del 15% e argilla inferiore o uguale al 18%) 3) franco-limoso (argilla  $\leq 35\%$  , sabbia  $< 15\%$ ). La densità apparente è compresa in un range che varia da 0.96 and 1.534 g cm<sup>-3</sup> (Fig. 23b), mentre la percentuale di sostanza organica varia da 0.9 a 11.4 % (Fig. 23c).

Le simulazioni sono state effettuate per le colture di frumento duro e di trifoglio incarnato per la stagione colturale 2008-2009. Per tale motivo è stato necessario preliminarmente individuare le superfici in cui erano coltivate tali colture nell'anno di riferimento attraverso l'utilizzo di informazioni ottenute da un database AGEA e d'immagini satellitari.

#### **3.2.2.1. Classificazione territoriale della Provincia di Viterbo**

Le informazioni sulla distribuzione spaziale delle colture nel territorio della Provincia, sono state reperite dal database della Agenzia per le erogazioni in agricoltura AGEA (<http://www.agea.gov.it/portal>). Tale database contiene le informazioni sulle dichiarazioni di coltivazioni fornite dagli agricoltori che accedono a misure di sostegno della Politica Agricola Comunitaria (PAC) e sono registrate a livello di particella catastale (per ogni record sono presenti il riferimento al foglio comunale ed alla particella catastale), dunque è stato possibile individuare (georeferenziare) su mappa, ogni singola particella catastale indicata come occupata nel 2009 da frumento duro o da trifoglio incarnato. Tuttavia tali particelle rappresentano solo un piccolo campione di tutti gli appezzamenti coltivati con tali colture nell'ambito della Provincia a causa della non totalità di dichiarazioni all'AGEA da parte degli agricoltori e della presenza di dati mancanti nel database. Per tale motivo tali dati sono stati utilizzati come verità a terra per una classificazione supervisionata di dati satellitari multitemporali. A tale scopo sono state utilizzate immagini satellitari LANDSAT 5 disponibili per l'anno 2009 nelle seguenti date: 6 Febbraio, 26 Aprile, 13 Giugno, 1 Agosto, 18 Settembre, 19 Ottobre. Le immagine acquisite sono state elaborate per ottenere la mappa con la spazializzazione delle colture di frumento duro e trifoglio incarnato della Provincia di Viterbo. La prima fase di pre-elaborazione delle immagini satellitari ha previsto la correzione radiometrica ed atmosferica mediante l'uso del modello Simplified Model for Atmospheric Correction (SMAC) (Rahman e Dedieu 1994). Successivamente è stato utilizzato l'algoritmo BV-NET (Baret et al., 2008) per ottenere la stima del LAI della Provincia di Viterbo, tramite l'addestramento di reti neurali artificiali con modello di trasferimento radiativo all'interno della vegetazione PROSAIL (Fig.24a e 24b).

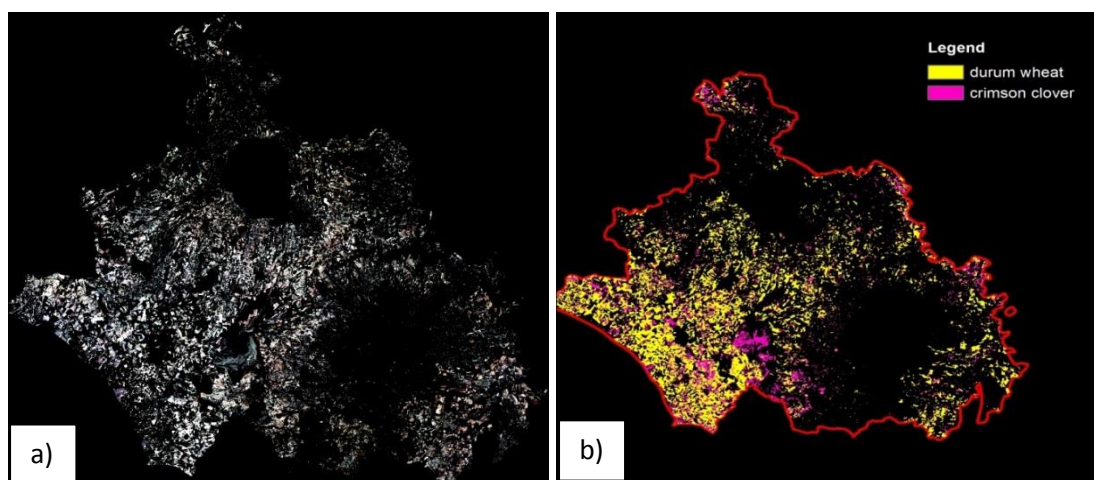


**Figura 24. a)** Immagine satellitare fornita da LANDSAT 5, **b)** Applicazione dell'algoritmo BV-NET e mappa del LAI provinciale.

Individuati i valori di soglia LAI e le relazioni tra i valori di LAI in date differenti dell'anno, sulla base del ciclo stagionale delle due colture, è stato applicato attraverso un algoritmo di classificazione ad albero decisionale per individuare le zone con sicura assenza di frumento o di trifoglio incarnato (Fig.25a) eliminando le aree con:

- LAI del 6 Febbraio > LAI del 26 Aprile
- LAI del 13 Giugno > LAI del 26 Aprile
- LAI del 13 Giugno > 0.3
- LAI del 19 Ottobre > 1.5

In seguito per determinare la presenza di frumento duro, e trifoglio incarnato nelle mappe LAI ottenute e dalla maschera provinciale, è stata applicata una classificazione supervisionata (Maximum Likelihood), utilizzando come set di training un subset ricavato dai dati AGEA. I risultati della classificazione sono stati validati utilizzando un altro subset indipendente dei dati ottenuti dal database AGEA, ottenendo un'accuratezza di circa il 88% per il grano duro e del 60% per il trifoglio. Le mappe ottenute dalla classificazione sono stati ricampionate ad una griglia di 50 metri in ArcGIS in formato raster secondo la griglia azimutale equivalente di Lambert ETRS\_1989 (sistema di coordinate di riferimento ETRS\_1989\_LAEA). La griglia è stata ottenuta da un subset della griglia nazionale INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe; INSPIRE, 2007) griglia di 1 km, Fig.25 b).



**Figura 25. a)** Maschera dell'immagine satellitare filtrata per la discriminazione delle colture **b)** Applicazione della classificazione Maximum Likelihood e spazializzazione del frumento duro e del trifoglio incarnato.

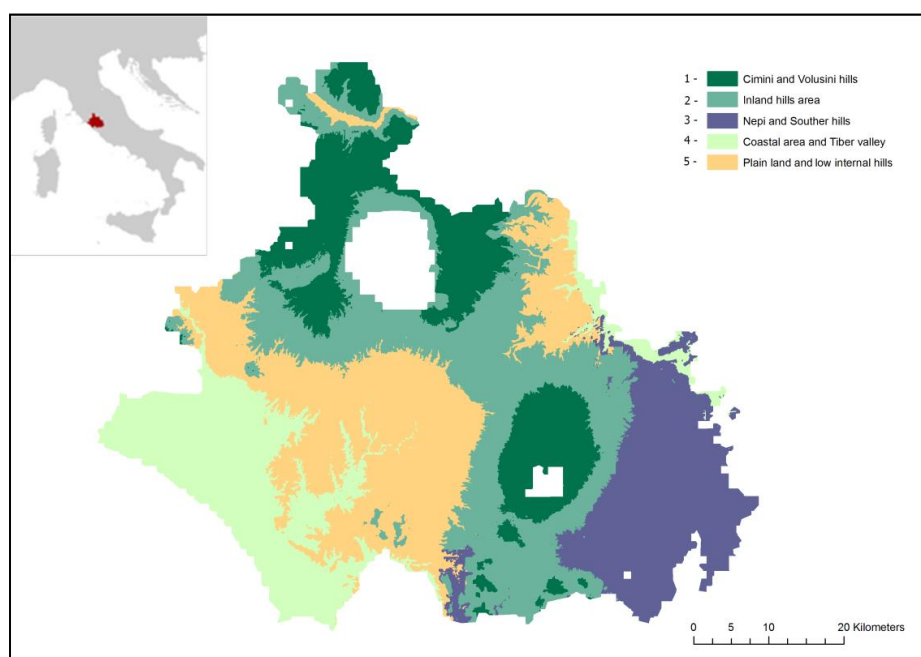
Al termine di questa procedura si sono ottenute le celle della griglia (pixels) contenenti grano duro o trifoglio incarnato, su cui far girare le simulazioni con DNDC. In totale l'area occupata da frumento duro è risultata comprendere 285.151 pixels (pari a circa 71.287 ha) quella da trifoglio incarnato 40.994 pixels (pari a circa 10.233 ha). Confrontando le stime ottenute con questa procedura con i dati ISTAT 2009 per la distribuzione delle colture nella Provincia di Viterbo, si riscontra una leggera stima per eccesso per l'erbaio di trifoglio incarnato (circa 3.000 ha in più) mentre per il cereale frumento duro si arriva a triplicare l'estensione stimata rispetto ai dati ISTAT (71.287 ha rispetto ai 23.500 ha dati ISTAT). Questo margine di errore è dovuto al fatto che quando viene applicato l'algoritmo BV-NET per la determinazione del LAI dalle immagini satellitari LANDSAT 5, nella stima di calcolo discriminatorio della maschera (zone con presenza o assenza di colture tramite l'utilizzo delle soglie del LAI) vengono conteggiati anche altre colture, che hanno lo stesso ciclo colturale autunno vernino. Di fatto se confrontiamo il totale dei cereali autunno vernini dai dati ISTAT notiamo che la superficie complessiva ricoperta è pari a circa 60.200 ha, un valore che si avvicina alla stima ottenuta con la procedura della classificazione Maximum Likelihood.

#### 3.2.2.2. Database pratiche agricole provinciali

E' stato messo a punto un database contenente informazioni sugli itinerari tecnici utilizzati nella Provincia di Viterbo per le principali colture agrarie, da impiegare negli input delle simulazioni con il modello DNDC a scala provinciale. Le informazioni sono state reperite da tesine svolte dagli studenti universitari durante gli anni 1985-2007 a seguito di visite dirette presso aziende agricole, per

il corso “Sistemi culturali” e di alcune interviste fatte dai studenti laureandi negli anni 2010-2012 ad agricoltori. Il database comprende dati raccolti in 177 aziende della Provincia di Viterbo ricoprendo complessivamente un area di circa 12500 ha di superficie agricola utilizzabile (SAU). Le colture maggiormente descritte e rappresentate nel database sono i cereali e gli erbai tra le erbacee, le solanacee tra le ortive, mentre per le colture arboree i nocciuleti, gli uliveti e i vigneti. Le informazioni contenute nel database sono: le epoche e tipologie di lavorazioni del terreno; le date di semina; il tipo e le quantità di fertilizzanti; il tipo di diserbo eventualmente utilizzato; la data di raccolta e la resa media. Essendo la Provincia di Viterbo molto eterogenea a livello geografico e climatico, anche le pratiche agronomiche sono risultate leggermente diverse a seconda della zona analizzata: ad esempio nelle zone vicino al litorale tirrenico, la semina dei cereali è posticipata anche di due mesi rispetto alle zone dell’entroterra collinare. Al fine di ottimizzare gli input per la simulazione con DNDC sono state definite delle aree omogenee agricole di gestione (HSMU) e le zone climatiche in provincia di Viterbo, come suggerito da Leip et al. (2008). E' stata adottata una analisi multivariata dei dati climatici e topografici, utilizzando la tecnica di classificazione non supervisionata ISO-cluster (Richards, 1986). I dati utilizzati per l'analisi sono stati la temperatura media annuale e la quantità di pioggia estratti dal dataset EFSA (Heiderer et al., 2012) e le informazioni topografiche dal modello digitale di elevazione ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM) (Tachikawa et al., 2011).

La Fig. 26 mostra le zone che sono state identificate al termine di questa applicazione (Casa R. et al, 2011).



**Figura 26.** *Suddivisione della Provincia di Viterbo nelle zone agroclimatiche*

In totale sono state identificati cinque zone di seguito riportate con un codice:

1. Zona dei monti Cimini e Vulsini
2. Zona delle colline interne
3. Zona delle colline del sud e Nepi
4. Zona costiera e valle del Tevere
5. Pianure e bassi rilievi interni

Dopo aver popolato il database degli itinerari tecnici e suddiviso la Provincia in 5 zone agroclimatiche, le aziende agricole sono state classificate (Tabella.3) in base alla loro posizione spaziale nell'area del viterbese, desunta dai dati catastali acquisiti per ciascuna azienda agraria. Nella Tab.6 è riassunto il numero delle aziende, la loro estensione e la zona provinciale di classificazione.

**Tabella 6.** *Spazializzazione delle aziende agricole esaminate e suddivisione nelle diverse zone climatiche*

| <b>ZONA</b>                      | <b>Codice</b> | <b>n° aziende</b> | <b>%</b>   | <b>SAU (ha)</b> |
|----------------------------------|---------------|-------------------|------------|-----------------|
| Monti Cimini e Vulsini           | 1             | 20                | 11.3       | 723.9           |
| Colline interne                  | 2             | 63                | 35.59      | 3261.2          |
| Colline del sud e Nepi           | 3             | 28                | 15.82      | 1131            |
| Zona costiera e valle del Tevere | 4             | 25                | 14.12      | 4004.3          |
| Pianure e bassi rilievi interni  | 5             | 41                | 23.16      | 3542.2          |
| <b>TOT</b>                       |               | <b>177</b>        | <b>100</b> | <b>12671.6</b>  |

### 3.2.3. Valutazione dei risultati delle simulazioni con DNDC

L'analisi quantitativa di un modello ci permette di valutare quanto i dati simulati siano accurati rispetto ai dati misurati. Si possono scegliere diverse modalità di analisi, le più frequenti sono le analisi delle coincidenze, le analisi delle associazioni e le analisi che racchiudono entrambe le tipologie (Smith et al 1996). L'analisi delle coincidenze identifica le differenze tra valori simulati e misurati, usando degli indicatori per calcolare le statistiche che quantificano tali differenze. Le statistiche possono indicare in che modo la differenza totale può essere scomposta tra le componenti positive e negative (BIAS), oppure può escludere qualsiasi differenza associata con le variazioni nelle misure. Ognuno di questi modi di esprimere la differenza fornisce informazioni uniche. L'analisi

dell'associazione ci indica quanto accurate siano le tendenze dei valori simulati. È importante analizzare le tendenze nonché la differenza tra i valori simulati e misurati perché questo indica se il modello fornisce risposte adeguate ai cambiamenti delle condizioni misurate e le probabilità che continui a simulare il sistema sia in condizioni diverse. Se la differenza tra i dati misurati e simulati è piccola, significa che è presente un'alta associazione, dunque la simulazione dei dati è molto accurata. Solitamente è possibile che i valori misurati e simulati siano strettamente associati (modello con potenzialità elevate), ma la differenza tra loro potrebbe essere alta, questo potrebbe suggerire che il modello è abbastanza affidabile, ma alcuni errori sistematici provocano uno spostamento della simulazioni e impediscono un buon "Fit" dei dati. La componente cruciale (e spesso limitante) di un'analisi quantitativa è la comparazione dei dati misurati rispetto ai dati simulati dal modello. La natura dei dati disponibili determina la scelta delle statistiche più appropriate sulla utilizzazione e la valutazione del modello. Dunque l'accuratezza delle misure reali limita l'accuratezza della valutazione del modello. Tuttavia si può dire che se un modello simula misure in condizioni specifiche, accuratamente, con ogni probabilità simulerà le misure in condizioni simili, con la stessa precisione, nonostante vengono cambiate le condizioni di Input (es. fattori climatici, coltura agraria, caratteristiche del suolo). Un'accurata analisi quantitativa delle prestazioni di un modello dovrebbe utilizzare delle misure indipendenti per l'intera gamma di condizioni in cui il modello deve essere utilizzato e deve fornire valutazioni sia di associazione che di coincidenza tra le simulazioni e i dati raccolti misurati in condizioni reali (Smith et al., 1997).

#### *3.2.3.1. Analisi statistiche a livello di sito*

In base alla natura dei dati disponibili e al tipo di ricerca analizzato in questo caso abbiamo scelto l'indice LOFIT per determinare l'accuratezza dei dati per la valutazione del modello DNDC, a livello di sito. L'indice Lack of fit (LOFIT) è un indice che calcola l'accuratezza della simulazione, prevedendo l'utilizzo della statistica per calcolare l'assenza di differenze nella varianza delle misurazioni, separando gli errori dovuti dalla varianza delle misurazioni, dagli errori dovuti alla differenza tra il simulato ed i valori misurati (Eq. 12). Solo gli errori dovuti dalla differenza tra i valori simulati e misurati possono essere attribuiti al fallimento del modello, quindi ha senso utilizzare solo questi errori per valutare le prestazioni del modello (Whitmore, 1991). La significatività dell'indice LOFIT è determinato usando un F-test che compara la varianza del Indice LOFIT e l'errore associato con la varianza delle misure. La probabilità di associazione al valore F può essere ottenuta tramite confronto di tabelle statistiche standard della distribuzione F (Eq.13).

$$LOFIT = \sum_{i=1}^n m_i (O_i - P_i)^2 \quad (12)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - 1) \times LOFIT}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} ((O_{ij} - P_i) - (O_i - P_i))^2} \quad (13)$$

Dove

$M_i$ : numero delle repliche

$O_i$ : valore medio delle misure reali

$P_i$ : valore trovato con le simulazioni

$n$ : numero delle simulazioni e delle misure reali che vengono comparate

$O_{ij}$ : numero delle repliche delle misure reali

La statistica descritta fornisce una valutazione sufficientemente esauriente per calcolare la coincidenza e l'efficienza di un modello (Loaguea and Green, 1991). Abbiamo eseguito questa analisi con le prove effettuate nel corso degli anni nei siti di ricerca di Roccarespampani, confrontando i dati giornalieri misurati di NEE dalle torri eddy covariance (Net Ecosystem Exchange) con i flussi di NEE simulati dal modello DNDC 9.5. E' stato inoltre calcolato il coefficiente di correlazione. Tale statistica può assumere un valore compreso tra -1 e 1. Un coefficiente di correlazione pari a 1 indica una correlazione positiva perfetta: i valori simulati sono fortemente associati con i valori misurati, suggerendo che il modello esegue perfettamente la simulazione come i dati osservati nelle misurazioni in campo. Il coefficiente di correlazione calcolato in questo modo non dà informazioni su come i valori misurati e valori simulati corrispondono ma indica solamente quanto siano simulate bene le tendenze. Per valutare l'accuratezza della simulazione, è stato utilizzato il programma MODEVAL 2.0 (Smith et al., 1996) che permette di analizzare statisticamente i risultati delle simulazioni, attraverso il calcolo di diversi indici che mettono in relazione i dati misurati con i dati simulati.

### *3.2.3.2. Analisi dell'incertezza a livello regionale*

Al fine di quantificare l'incertezza della stima del flusso NEE durante la coltivazione del grano duro e del trifoglio incarnato a livello regionale, ottenuta mediante simulazioni con il modello DNDC, sono stati individuati alcuni input e parametri ritenuti sensibili per la stima di NEE, attraverso un'accurata analisi bibliografica (Tab.7). Le simulazioni sono state ripetute 100 volte estraendo ogni volta casualmente i parametri e gli input sensibili all'interno di un intervallo individuato per i parametri più sensibili come suggerito da Hastings et al., (2010) e Qin et al., (2013). L'incertezza della stima è rappresentata dalla deviazione standard dei 100 valori di NEE. Questo processo non è stato possibile ripeterlo per ognuno dei 326.145 pixels dei campi individuati all'interno della provincia di Viterbo, ma per ridurre sensibilmente il volume di calcolo, le simulazioni hanno riguardato solo alcuni sottoinsiemi rappresentativi dei pixel. La scelta dei sottoinsiemi rappresentativi è avvenuta mediante un processo di clustering. Tale processo ha previsto in primo luogo la suddivisione della Provincia di Viterbo in dieci zone climatiche sulla base dei dati di Beer et al., (2014), dopodiché all'interno di ciascuna delle zone climatiche sono state delimitate delle sub-zone individuate dalle zone agroclimatiche (paragrafo 3.2.2.2); all'interno di ciascuna sub-zone è stata eseguita un'analisi cluster mediante l'algoritmo K-means (Hartigan e Wong, 1979) per i campi coltivati con ognuna delle due colture prese in esame (frumento duro e trifoglio incarnato). Le variabili considerate dall'algoritmo di clustering riguardano le caratteristiche fisiche e chimiche del suolo, il numero di cluster in ciascuna sub-zona è stato individuato in base alla minimizzazione della somma dei quadrati entro i cluster (Forgy, 1965). Per ogni cluster è stato quindi individuato il centroide, al quale è stato associato un sottoinsieme rappresentativo per le simulazioni ripetute dalle quali è stata estratta la deviazione standard.

**Tabella 7.** Parametri utilizzati per l'analisi dell'incertezza delle simulazioni di Net Ecosystem Exchange (NEE) a livello regionale con il modello DNDC.

| FATTORE | INPUT MODELLO                 | Range di variazione     | Riferimento Bibliografico |
|---------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| CLIMA   | Temperatura                   | $\pm 1^{\circ}\text{C}$ | Hastings et al 2010       |
|         | Pioggia                       | $\pm 2 \text{ mm}$      |                           |
| SUOLO   | Sostanza Organica (SO)        | $\pm 10 \%$             | Hastings et al 2010       |
|         | Argilla                       | $\pm 6 \%$              |                           |
|         | Sabbia                        | $\pm 6 \%$              |                           |
|         | pH                            | $\pm 0.5$               |                           |
|         | *Capacità di campo            | f(tessitura; SO)        | Saxton et al., 2006       |
|         | *Punto di appassimento        | f(tessitura; SO)        | Saxton et al., 2006       |
|         | *Porosità                     | f(tessitura; SO)        | Saxton et al., 2006       |
| COLTURA | Fabbisogno idrico / Grano     | $\pm 50$                | Qin et al., 2013          |
|         | Fabbisogno idrico / Trifoglio | $\pm 100$               |                           |
|         | Produzione massima            | f(Zone agroclimatiche)  | Casa et al., 2011         |
|         | Fertilizzazione               | f(Zone agroclimatiche)  |                           |

\*I valori di capacità di campo, punto di appassimento e porosità del terreno dipendono dal contenuto di argilla, sabbia e sostanza organica, sono stati determinati mediante le equazioni presenti in Saxton et al., (2006).

## 4. Risultati e Discussioni

### 4.1. Andamento dell'accrescimento, risultati produttivi e flussi di C dei sistemi colturali misurati presso il sito di Roccarespampani

Nel sito di Roccarespampani le misure dei flussi di C con la tecnica EC sono state effettuate dal 2007 al 2013, tuttavia per la determinazione del bilancio del carbonio (NECB) sono state selezionate quattro annate, evidenziante in grassetto nella Tab.8, nelle stagioni in cui le colture sono state monitorate raccogliendo anche dati ancillari comprendenti rilievi biometrici sulla coltura e sul suolo.

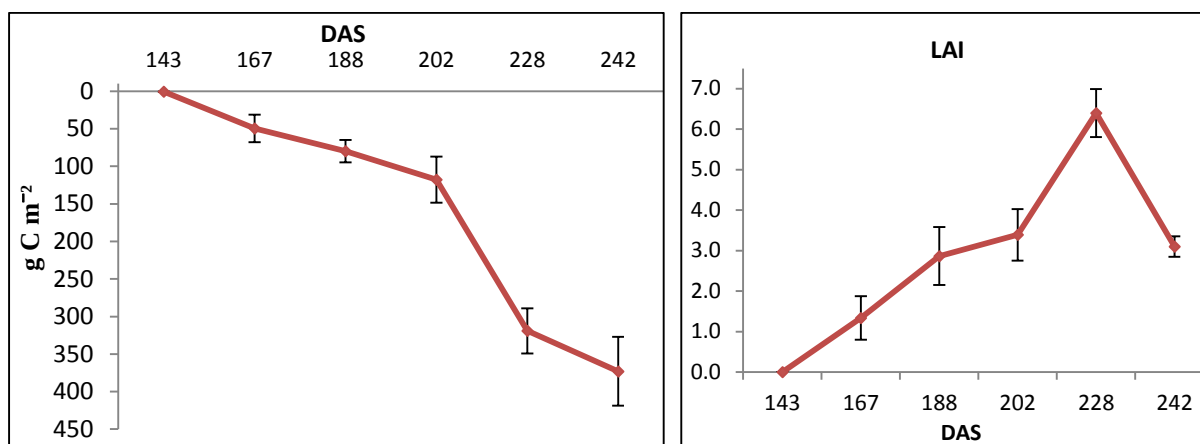
**Tabella 8.** Cronogramma delle annate agrarie nei campi sperimentali, in grassetto le colture monitorate e studiate dal dipartimento DAFNE.

| Annata Agraria | IT-Ro3                     | Semina     | Raccolta   | IT-Ro4                     | Semina     | Raccolta   |
|----------------|----------------------------|------------|------------|----------------------------|------------|------------|
| 2009-2010      | <b>Trifoglio incarnato</b> | 08/11/2009 | 01/07/2010 | Trifoglio incarnato        | 10/11/2009 | 03/07/2010 |
| 2010-2011      | <b>Frumento duro</b>       | 06/12/2010 | 29/06/2011 | Trifoglio incarnato        | 09/11/2010 | 29/06/2011 |
| 2011-2012      | Avena-Veccia               | 20/10/2011 | Pascolo    | <b>Trifoglio incarnato</b> | 24/10/2011 | 01/07/2012 |
| 2012-2013      | <b>Trifoglio-Loietto</b>   | 08/10/2012 | 20/05/2013 | <b>Avena-Veccia</b>        | 09/10/2012 | 22/05/2013 |

Di seguito riportiamo i risultati ottenuti durante le stagioni colturali susseguite nel corso degli anni nei campi sperimentali.

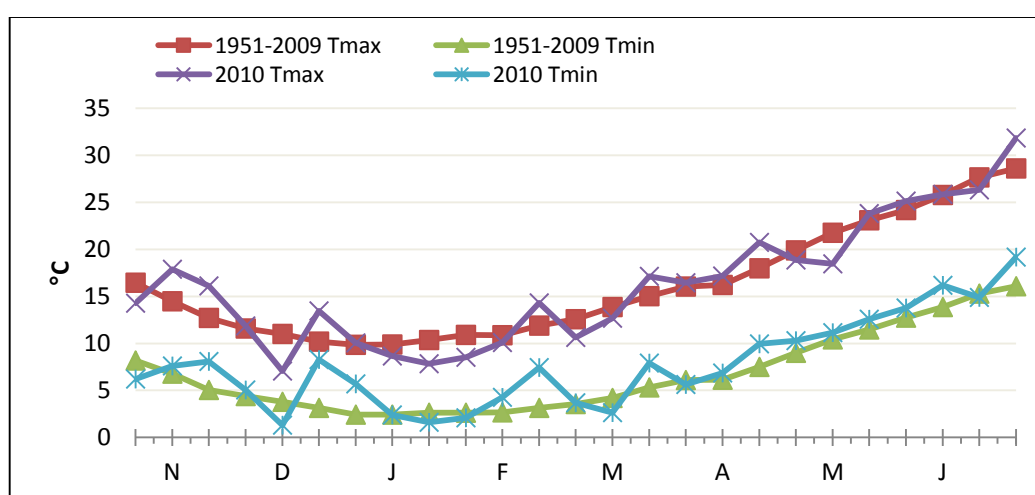
#### 4.1.1. Stagione colturale 2009-2010

Durante l'annata agraria 2009-2010 il sito IT-Ro3 è stato occupato dalla coltura di trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.), seminato il giorno 8/11/2009 con una dose di 40 kg ha<sup>-1</sup> di semente certificata, tramite seminatrice universale. La Fig. 27a ci illustra l'andamento della biomassa epigea raccolta durante i 6 campionamenti nel ciclo produttivo della coltura, espressa in grammi di carbonio su metro quadrato. Poiché si tratta di accumuli e non di perdite di C in atmosfera, i valori sono negativi per convenzione. Il picco di biomassa si è registrato a 242 giorni dopo la data di semina (12/06/2010) pari a  $378 \pm 45,8$  g C m<sup>-2</sup> a circa due settimane dalla trebbiatura del trifoglio da granella.



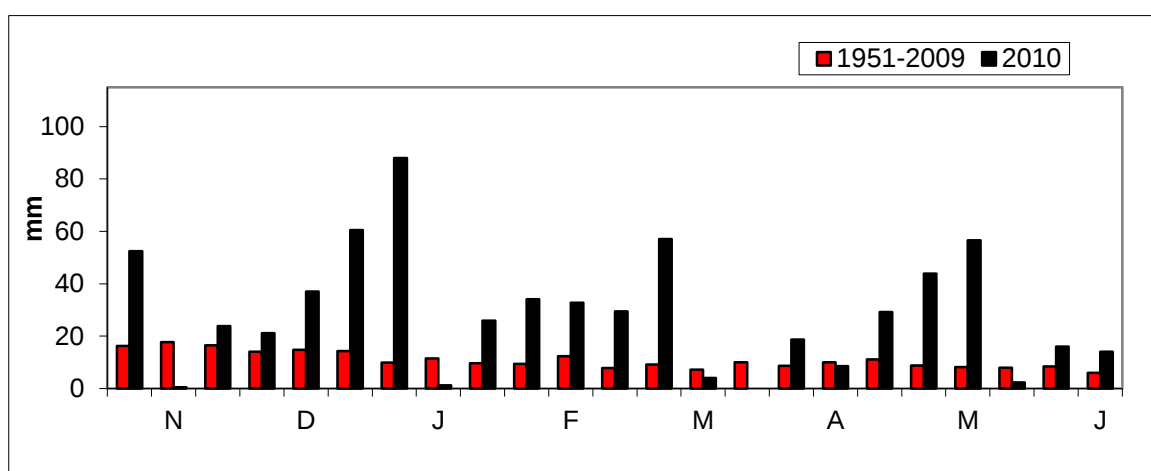
**Figura 27.** Grafici relativi alla stagione produttiva 2009-2010, trifoglio incarnato IT-Ro3 a) Biomassa, b) LAI

La Fig.27b, ci permette di osservare l'andamento del LAI (Leaf Area Index) del trifoglio, analizzato tramite metodo distruttivo utilizzando solo le foglie della coltura, escludendo le altre parti verdi. Il picco è stato registrato durante il 5° campionamento della biomassa avvenuta a 228 giorni dalla semina (25/05/2010) quando la gran parte della coltura era nella fase di infiorescenza, per un valore di LAI di 6.1. Il ciclo colturale si è chiuso con la raccolta della semente di trifoglio, tramite trebbiatura il 1/07/2010 destinata alla vendita sul mercato locale, per l'impianto di erbai e pascoli, pari a circa 510 kg ha<sup>-1</sup>. Analizzando i dati meteorologici, si può osservare (Fig. 28), che confrontando le temperature massime e minime annuali della stagione 2009-2010, con le temperature massime e minime storiche, le temperature massime nelle due decadi di giugno 2010 sono più elevate di circa 3.5 °C rispetto alla media di lungo periodo. Anche le temperature minime medie delle prime due decadi di giugno sono più alte di circa 3.6 °C rispetto alla serie storica (1951-2009).



**Figura 28.** Andamento termico dell'annata agraria 2009-2010, delle temperature medio massime e minime del sito di Roccarespampani (VT), confrontate con la serie storica 1951-2009.

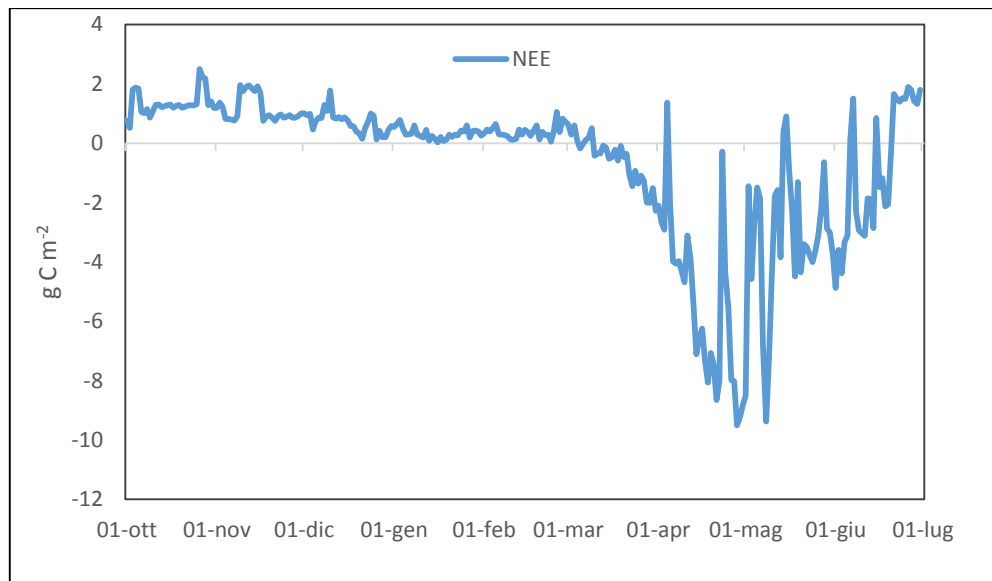
Durante il ciclo colturale del erbaio, le precipitazioni si sono concentrate subito dopo la semina (Fig. 29), avvenuta nella prima decade di novembre, nel periodo invernale di dicembre e gennaio, con picchi che superano i 60 mm di pioggia (ultima decade di dicembre) e 80 mm di pioggia (prima decade di gennaio) per un totale di 642 mm nel periodo ottobre - luglio 2009-2010, superando di circa 400 mm le medie storiche stagionali registrate dal 1951 pari a 243 mm nello stesso periodo di riferimento. Questa disponibilità maggiore di acqua nel periodo primaverile dopo il riposo vegetativo estivo, ha favorito le condizioni di sviluppo della coltura, ottenendo un ottimo raccolto di semente di trifoglio (510 kg SS ha<sup>-1</sup>) quantitativo superiore della media di granella raccolta nel corso degli anni nell'azienda (circa 350 kg SS ha<sup>-1</sup>).



**Figura 29.** Andamento pluviometrico storico e stagionale annata agraria 2009-2010.

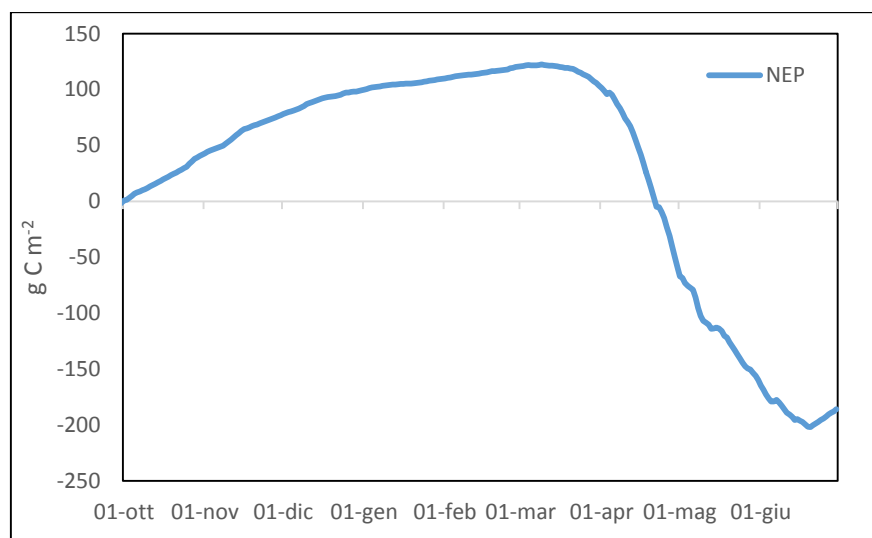
La Fig. 30 mostra l'andamento del flusso di carbonio registrato dalla stazione EC durante la stagione produttiva del trifoglio incarnato, 1 ottobre 2009 -1 luglio 2010. Esaminando il grafico si osserva che all'inizio del ciclo colturale il sito perde più carbonio di quanto ne assimili a causa delle lavorazioni preparatorie al letto di semina (erpatura, profondità 20 cm) effettuata alla fine di ottobre. Dopo la semina avvenuta 8 novembre 2009, l'appezzamento continua ad avere un'emissione di carbonio (valori positivi di flusso) dovuta al prevalere della respirazione dell'agroecosistema sulla fotosintesi, (coltura poco sviluppata, fase vegetativa di stasi invernale) fino alla prima decade di marzo. Dopo questa data la coltura, sfruttando la ripresa vegetativa dovuta all'aumento della temperatura media dell'aria (Fig.28) e alla disponibilità delle riserve idriche immagazzinate nel terreno, frutto delle copiose piogge invernali (Fig.29) ha un forte sviluppo della biomassa colturale, causato da un'ottima attività fotosintetica fino alla fine di maggio. Il ciclo colturale termina al momento della trebbiatura della granella di trifoglio incarnato, si osserva dal grafico come l'andamento della NEE subisca un rallentamento dopo la seconda metà di giugno, causato dalla

diminuzione dell'attività fotosintetica per la perdita di clorofilla da parte degli organi fotosintetici (ingiallimento e perdita delle foglie) e maturazione della granella.



**Figura 30.** Andamento della NEE registrata dalla stazione EC durante il ciclo colturale 2009-2010.

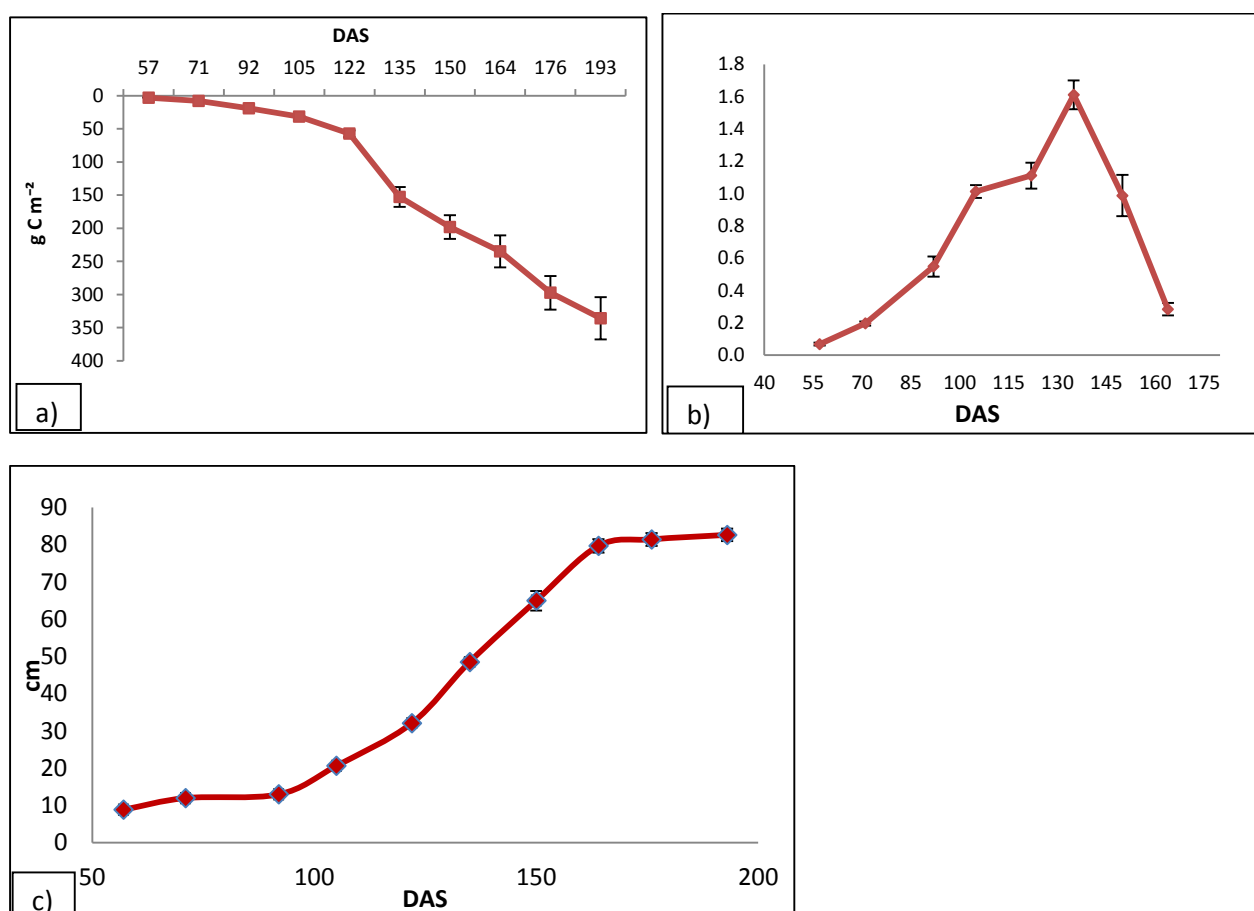
La Fig.31 mostra il ciclo colturale complessivo la Net Ecosystem Production della coltura di trifoglio incarnato (periodo 1/10/2009 – 1/07/2010) per un valore di NEP pari a  $-182.9 \text{ g C m}^{-2}$ . Successivamente questo valore sarà utilizzato per la stima del bilancio del carbonio (NECB) a livello di sito.



**Figura 31.** NEP cumulativa coltura trifoglio incarnato IT-Ro3 annata agraria 2009-2010.

#### 4.1.2 Stagione colturale 2010-2011

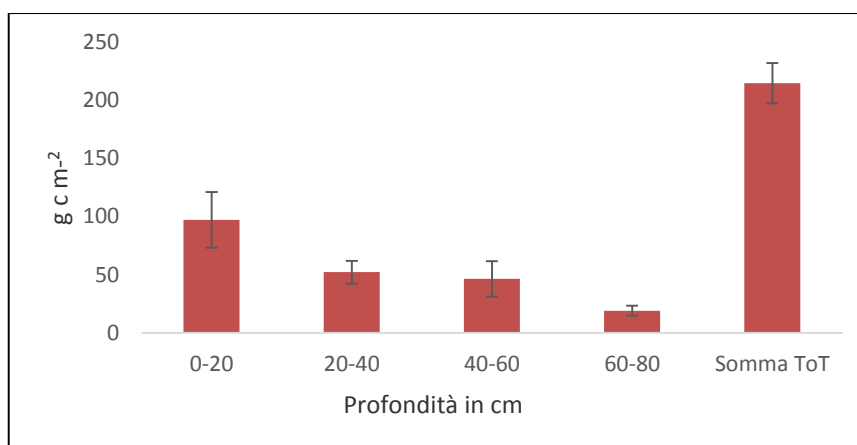
Durante l'annata agraria 2010-2011 il sito IT-Ro3 era coltivato con frumento duro (*Triticum durum* Desf.), seminato tramite seminatrice universale il 6/12/2010 con una dose di 235 kg ha<sup>-1</sup> di semente certificata. E' stata effettuata una fertilizzazione con concime organico (Nutri Green C-N 8-35) con apporti pari a 150 kg ha<sup>-1</sup> corrispondenti a circa 83,75 kg C ha<sup>-1</sup> (0.008 g C m<sup>-2</sup>) applicati con spandiconcime conico il 31/10/2010. Durante questo ciclo colturale sono stati raccolti 11 campioni di biomassa sulla coltura di frumento duro (*Triticum durum* Desf.). L'analisi di crescita riportata nella Fig. 32a ci permette di osservare che l'ultimo campionamento effettuato a ridosso alla raccolta della granella il 17/06/2011 è quello con la presenza maggiore di biomassa pari a  $355.7 \pm 31,9$  g C m<sup>-2</sup>.



**Figura 32.** Grafici relativi alla stagione produttiva 2010-2011, frumento duro IT-Ro3 **a)** Biomassa, **b)** LAI, **c)** Canopy

La Fig. 32b e la Fig. 32c, ci permettono di osservare l'andamento del LAI e dell'altezza della coltura di frumento durante il ciclo colturale. Lo sviluppo fogliare maggiore e conseguentemente il dato di LAI più alto ottenuto è stato durante il 6° campionamento di biomassa (20/04/2011) effettuato a 135

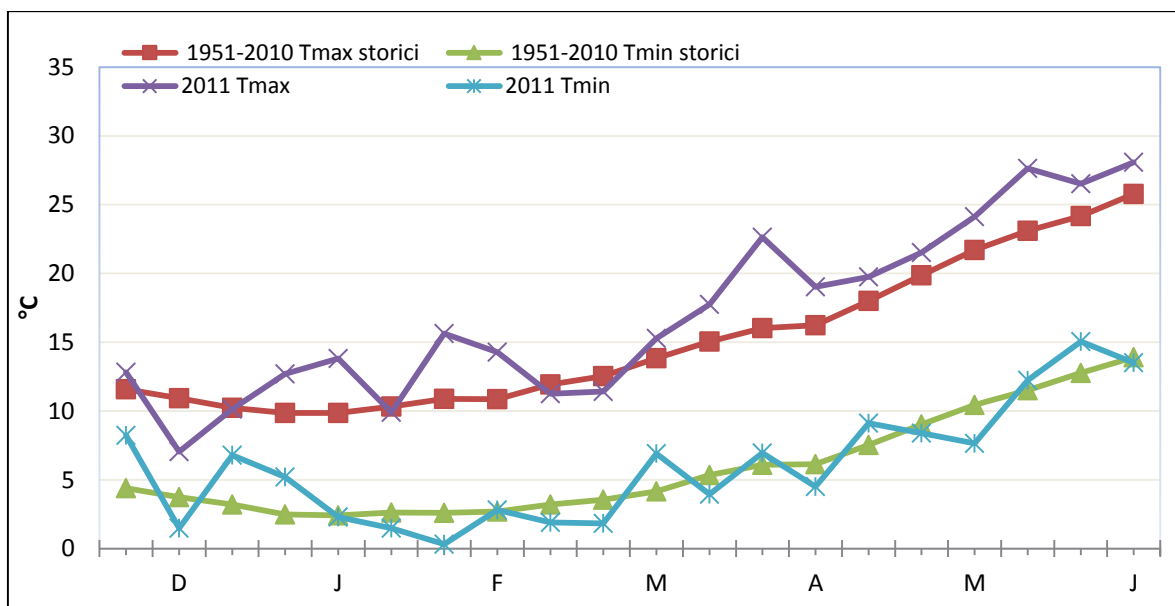
giorni dalla data di semina con un valore pari a 1.61. I successivi campionamenti di biomassa e relativo calcolo del LAI con metodo distruttivo, hanno mostrato valori inferiori in quanto il frumento duro stava passando dalla fase di maturazione lattea, fase di maturazione cerosa, fino al completo ingiallimento delle foglie nella fase di maturazione farinosa della cariosside. La massima altezza della coltura è stata registrata durante il 10° rilievo, l'ultimo della stagione, pari a  $82,6 \pm 1,69$  cm avvenuto il 17/06/2011 a 193 giorni dopo la semina.



**Figura 33.** Grafico relativo alla raccolta delle radici di frumento alla profondità 0-80 cm con carotatore conico a manovella distribuito da Eijkelkamp.

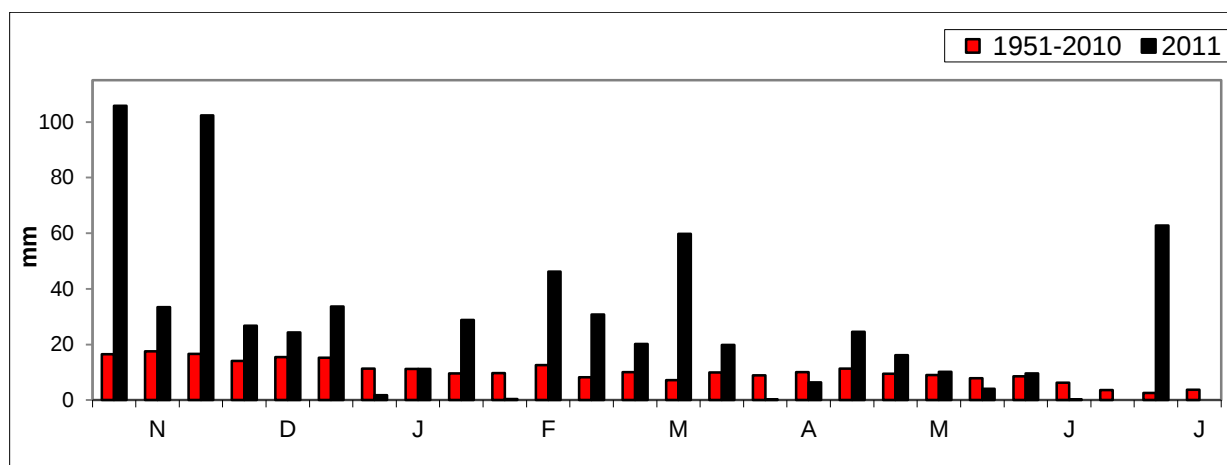
Il campionamento delle radici è stato effettuato durante la seconda decade di maggio quando il frumento si trovava nella fase di inizio antesi, ad intervalli di profondità di prelievo di 20 cm (per un totale di quattro livelli 0-20; 20-40; 40-60, 60-80) adottando uno schema che prevedeva 21 rilievi, divisi tra fila, interfila e sulla pianta di frumento (7 ciascuno) per poter raccogliere in modo più omogeneo possibile il campione finale di radici. La Fig. 33 mostra come la quantità maggiore di radici è stata rilevata nello strato di terreno 0-20 cm con un valore pari a  $97,3 \pm 23,9$  g C m<sup>-2</sup>, mentre per l'intero profilo di indagine è stato rilevato un valore di  $214,83 \pm 17,4$  g C m<sup>-2</sup>, utilizzando un valore del 40 % di C per il calcolo del contenuto delle radici, come stimato mediante analisi. La raccolta della granella è avvenuta il 29/06/ 2010, con un produzione di 4000 kg ha<sup>-1</sup>, mentre la paglia è stata raccolte nella prima decade di luglio, con un produzione totale di 3500 kg ha<sup>-1</sup>. La Fig. 34 ci permette di osservare che appena subito la semina si sono verificate delle gelate nel mese di dicembre 2010, che si sono protratte anche nei mesi di gennaio e febbraio 2011, portando le temperature medie minime in questi mesi prossimi allo 0° C, cioè inferiori alla media storica di circa 1.2°C. La temperatura medie massima ha subito un brusca diminuzione durante la seconda decade del mese di dicembre, 7.0 °C, inferiore ai 4°C della temperatura storica media massima. Fortunatamente la coltura non ha risentito delle temperature minime anomale. Mentre durante il ciclo colturale nell'ultima

decade di aprile e la seconda decade di maggio, le temperature medie massime hanno superato rispettivamente di 6.6 °C e 4.5°C la media storica riferita nel periodo 1951-2010.



**Figura 34.** Andamento termico, annata agraria 2010-2011 delle temperature medio massime e minime del sito di Roccarespanpani (VT), confrontate con la serie storica 1951-2010.

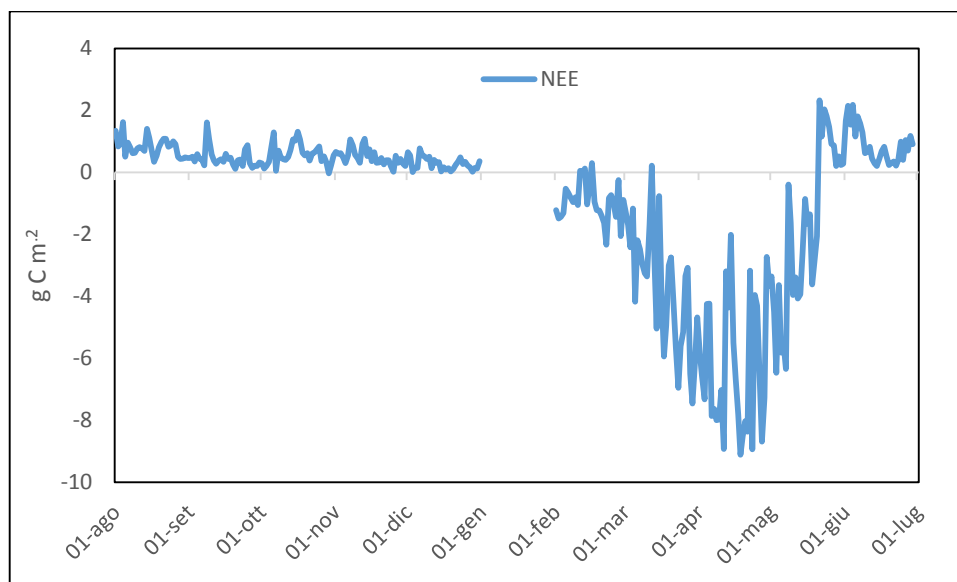
Le precipitazioni (Fig.35) durante il ciclo colturale Dicembre-Luglio, si sono distribuite prevalentemente nel periodo primaverile estivo, registrando nella seconda decade di marzo un picco di 60 mm di pioggia, nel complessivo sono caduti durante il ciclo 438 mm, rispetto ad un valore medio storico riferito allo stesso periodo di 212 mm (226 mm).



**Figura 35.** Andamento pluviometrico storico e stagionale annata agraria 2010-2011.

La Fig.36, mostra l'andamento del flusso di carbonio registrato dalla stazione EC tra il sistema pianta-suolo e atmosfera. Il periodo monitorato è stato dal 1 agosto 2010 al 29 giugno 2011

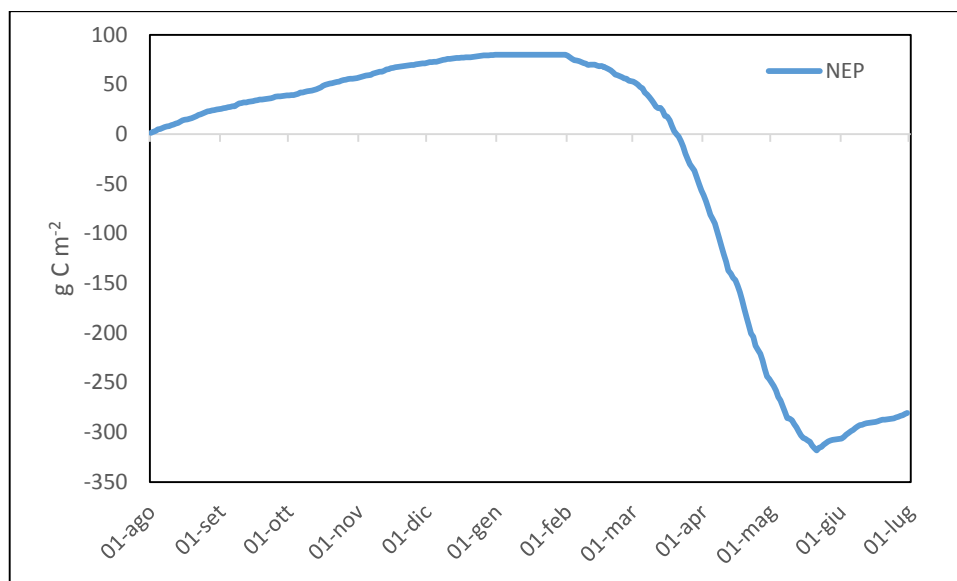
momento della raccolta della granella, in modo tale da comprendere nella stima di NEE anche i flussi di carbonio causati dalle lavorazioni del terreno. All'inizio del ciclo colturale il sito risente delle lavorazioni preparatorie del letto di semina (aratura a 30 cm di profondità) effettuate nella seconda metà di agosto, favorendo la respirazione eterotrofa del terreno da parte dei microorganismi, sprigionando carbonio dal terreno (valori positivi di flusso). Durante la stasi vegetativa invernale il sito sembra essere in equilibrio, valori di emissione di poco superiori a  $0 \text{ g C m}^{-2}$ , da segnalare una mancanza di dati nel mese di gennaio 2011, a causa del malfunzionamento della sonda LI-7500, nella stazione EC. Tuttavia la stazione è stata prontamente aggiustata in modo da continuare a monitorare il flusso durante il ciclo colturale del frumento, si osserva dal grafico che la ripresa vegetativa avvenuta agli inizi di marzo, favorita dalla temperature primaverile, ha contribuito all'aumento dell'attività fotosintetica della coltura, incominciando di fatto l'accrescimento della biomassa, facendo assorbire al sistema agrario più carbonio di quanto viene rilasciato. Questo trend negativo di flusso si registra fino alla maturazione cerosa da questa fase fenologica in poi la coltura tende a diminuire l'attività fotosintetica a causa del naturale essiccamento delle foglie, che porta ai diversi stadi di maturazione e riempimento della granella, fino ad arrivare a giugno agli inizi di giugno con flussi di carbonio positivi, con la coltura completamente secca, la granella matura pronta per essere raccolta (29 giugno 2011).



**Figura 36.** Andamento della NEE registrata dalla stazione EC durante il ciclo colturale 2010-2011.

Il trend di NEP colturale illustrato nella Fig.37 mostra che nella fase iniziale della stagione produttiva il sito produttivo perde quantità di carbonio, dovuto alle fasi di lavorazioni del terreno, per poi invertire questo flusso verso la capacità di sink (aiutato dall'attività fotosintetica della coltura) nel

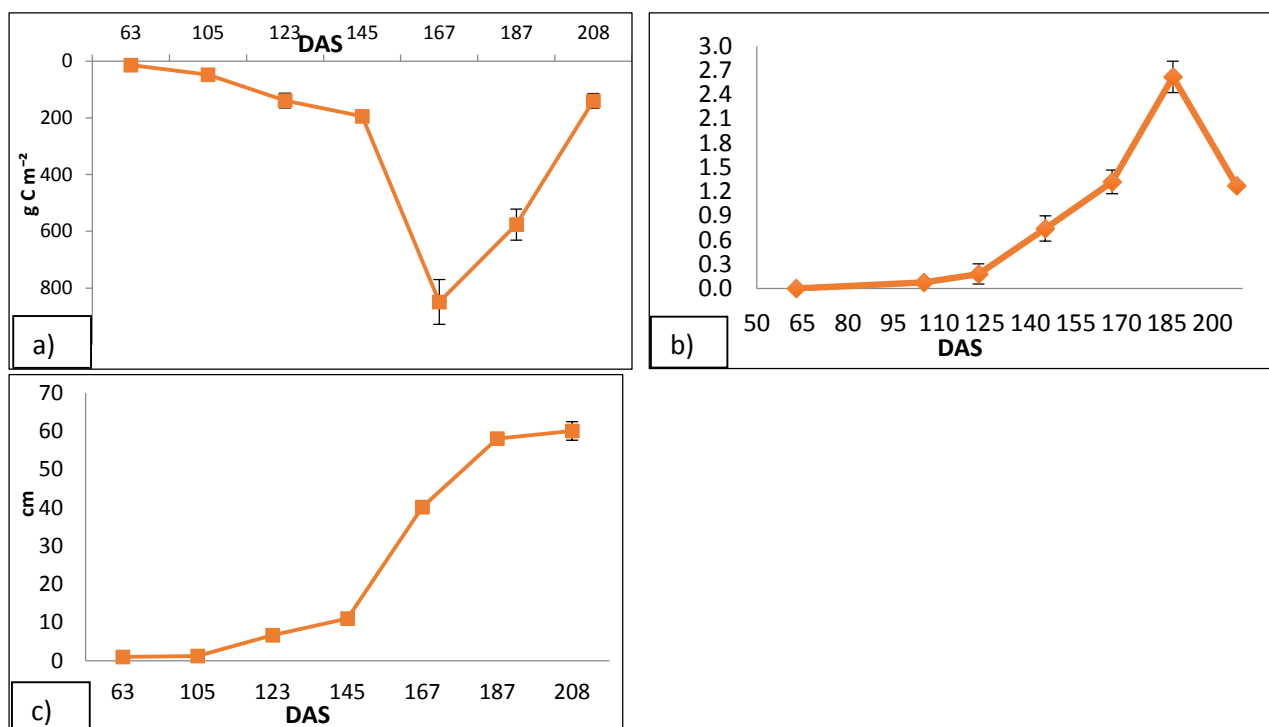
periodo di marzo. Il valore totale di NEP registrato durante la stagione produttiva 2010-2011 è stato pari a  $-280,7 \text{ g C m}^{-2}$ , valore utilizzato nella stima del bilancio del carbonio.



**Figura 37.** NEP cumulativa coltura frumento duro IT-Ro3 annata agraria 2010-2011

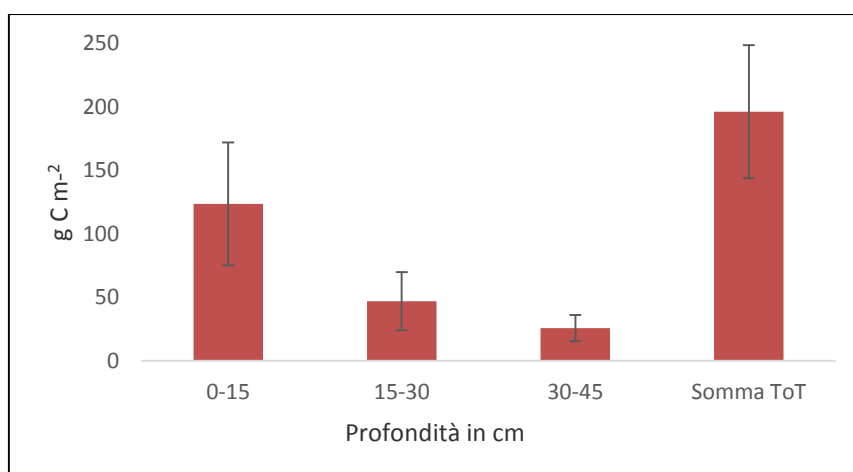
#### 4.1.3 Stagione colturale 2011-2012

Durante la stagione 2011-12 le colture presenti presso il sito sperimentale erano erbai, miscuglio di avena (*Avena sativa* L.) e veccia (*Vicia sativa* L.) destinata al pascolo fresco dei bovini nel sito IT-Ro3, mentre l'appezzamento sui cui sono stati eseguiti i rilievi (IT-Ro4) era coltivato con un erbaio di trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.) seminato il 24/10/2011 con una quantità di seme pari a  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ . La coltura è stata raccolta il 1/07/2012 con una produzione di granella da seme pari a  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ , riutilizzato nella gestione degli erbai dell'azienda. Nella prima settimana di luglio è stato anche raccolto il fieno come sottoprodotto della trebbiatura del trifoglio incarnato, impiegato per il foraggiamento invernale dell'allevamento aziendale di bovini, con una produzione pari a  $3200 \text{ kg ha}^{-1}$  di sostanza secca. La quantità di biomassa maggiore registrata durante i 7 rilievi è stata massima durante il 5° campionamento, pari a  $848,8 \pm 78,8 \text{ g C m}^{-2}$  avvenuto 9/05/2012 a 167 giorni dalla data di semina, con la coltura in fase di pre-fioritura (Fig. 38a). La maggiore superficie fogliare si è registrata durante il 6° campionamento con un valore pari a  $2,6 \pm 0,15$  (Fig.38 b) a 187 giorni dalla semina, mentre la massima altezza colturale il 7° ed ultimo rilievo di biomassa stagionale il 19/06/2012 a 208 giorni dalla data di semina pari a  $60,1 \pm 2,4 \text{ cm}$  (Fig.38c)



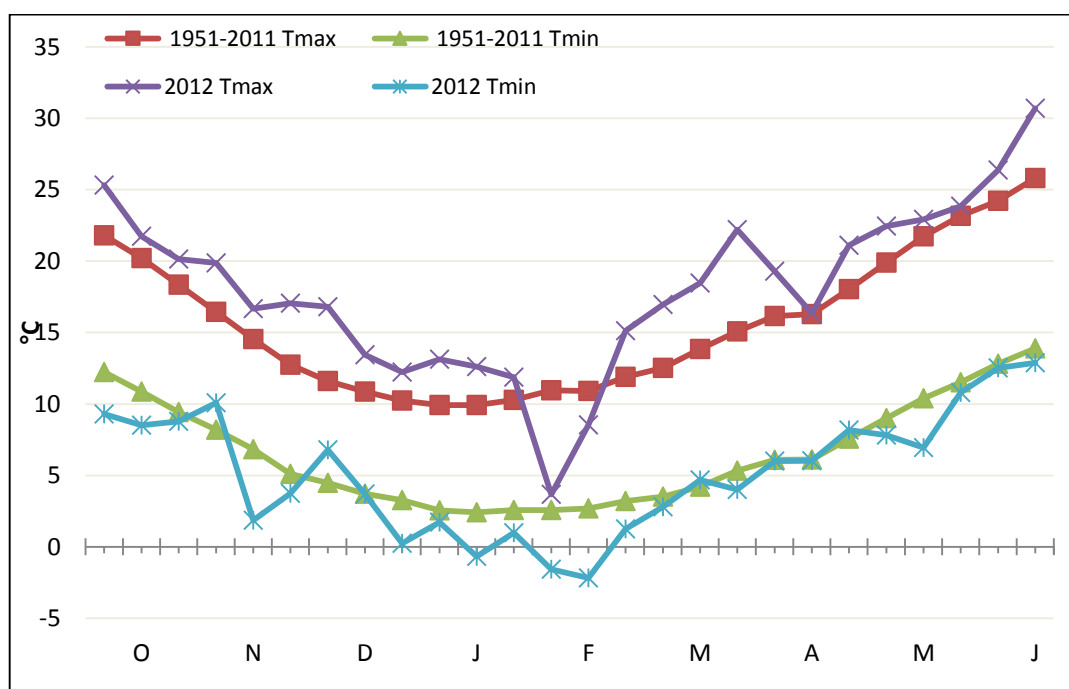
**Figura 38.** Grafici relativi alla stagione produttiva 2011-2012 **a) Biomassa** **b) LAI** **c) Canopy**

Il campionamento delle radici è stato fatto durante la prima decade di maggio quando il trifoglio incarnato si trovava nella fase di fioritura, ad intervalli di profondità di prelievo di 15 cm (per un totale di tre livelli 0-15; 15-30; 30-45, con 7 campionamenti ciascuno). La Fig. 39 mostra come la quantità maggiore di radici è stata rilevata nello strato di terreno 0-15 cm con un valore pari a  $123,5 \pm 48,3 g C m^{-2}$ , mentre nel totale è stata rilevata per l'intero profilo di indagine un valore pari a  $196,2 \pm 52,4 g C m^{-2}$ .



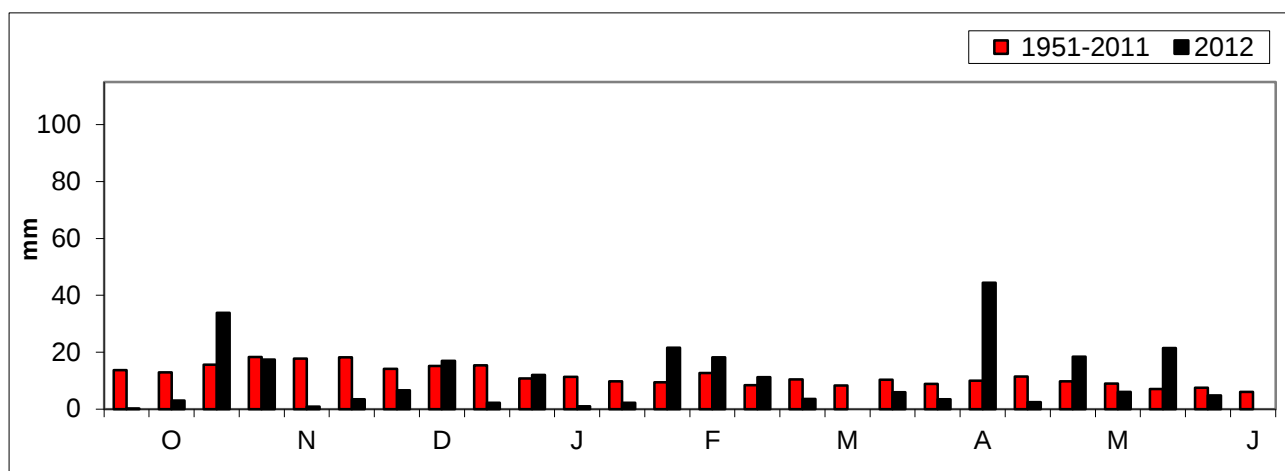
**Figura 39.** Grafico relativo alla raccolta delle radici del trifoglio incarnato alla profondità 0-45 cm con carotatore.

Durante il ciclo produttivo dell'erbaio, da ottobre 2011 a luglio 2012, si è registrato nei mesi invernali di dicembre, gennaio e febbraio, un lungo periodo di temperature medie minime sotto gli zero gradi. Diversi giorni di gelate hanno condizionato la nascita e l'accrescimento delle piantine di trifoglio durante il periodo dell'emergenza. Tale periodo è stato caratterizzato da una diminuzione della temperatura media minima pari a  $-2.7^{\circ}\text{C}$  rispetto alla media minima storica riferita allo stesso periodo durante gli anni 1951-2011. Mentre nel periodo primaverile estivo tra l'ultima decade di marzo e la prima di aprile si sono registrate delle temperature medie massime superiori di circa  $2.8^{\circ}\text{C}$  rispetto ai dati storici (Fig. 40).



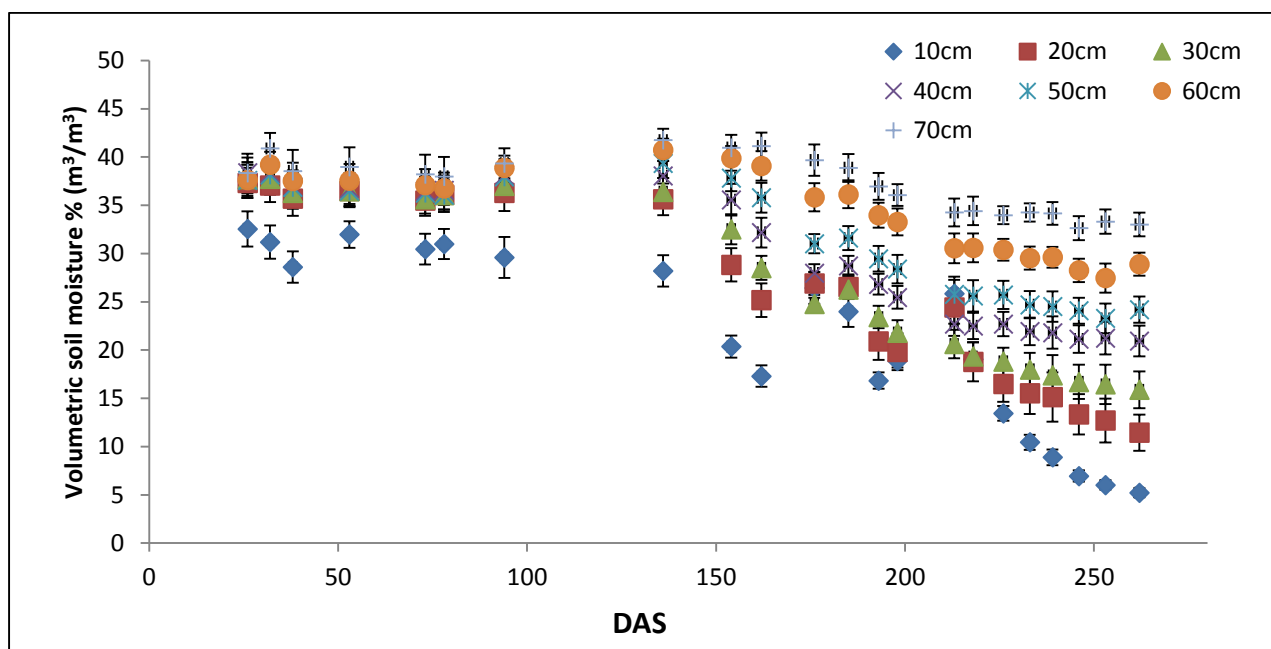
**Figura 40.** Andamento termico, annata agraria 2011-2012 delle temperature medio massime e minime del sito di Roccarespampani (VT), confrontate con la serie storica 1951-2010

L'andamento pluviometrico stagionale riportato nella Fig. 41 mostra come l'annata agraria ci sia stato un calo delle precipitazioni 261,1 mm di pioggia rispetto ai 305,5 mm delle precipitazione storiche periodo 1951-2011 (44,3 mm in meno rispetto alla media) concentrandosi soprattutto nella seconda decade di aprile e le prime due decadi di maggio, con picchi di 40 mm di pioggia per decade.



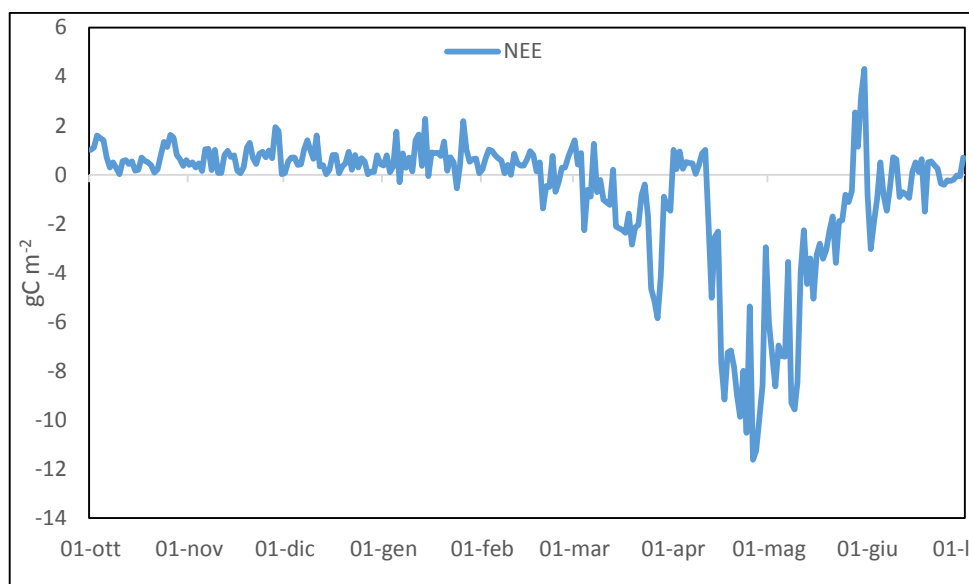
**Figura 41.** Andamento pluviometrico storico e stagionale annata agraria 2011-2012.

Gli andamenti dell'umidità del suolo nella stagione produttiva 2011-2012 sul sito di ricerca IT-Ro4 sono riportati nella Fig. 42. La coltura studiata era un erbaio di trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.). La coltura non ha subito nessun intervento di irrigazione, si è sviluppata solo con gli apporti idrici naturali. La stagione, si è rilevata essere poco piovosa, soprattutto nel periodo produttivo dell'erbaio, causando una produzione di semente molto bassa. Il grafico mostra gli strati di suolo interessati alla indagine del contenuto idrico (da 0 a 70 cm con livelli di misurazione ad intervalli di 10 cm). I dati rilevati dalle sonde, a partire da 26 giorni dopo la semina (DAS) avvenuta il 24/11/2011, fino a 96 giorni (data del 7° rilievo) mostrano che i contenuti idrici del suolo sono costanti nei diversi strati pari a  $36,4 \pm 1.1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (%) di media. Nel grafico è presente un periodo in cui non sono state effettuate le misure a causa di un malfunzionamento della sonda Diviner 2000 avvenuta nel mese di febbraio 2012 (DAS 12 circa). La sostituzione ha portato al ripristino delle misure il giorno 8/03/2012 a 136 giorni dalla data di semina. Da questa data in poi si può notare come gli strati superficiali 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, rispettivamente risentano del mancato apporto idrico da parte degli agenti naturali e come l'umidità nel terreno diminuisca a causa delle temperature in aumento (periodo primaverile-estivo) ed alla richiesta di acqua da parte della coltura.



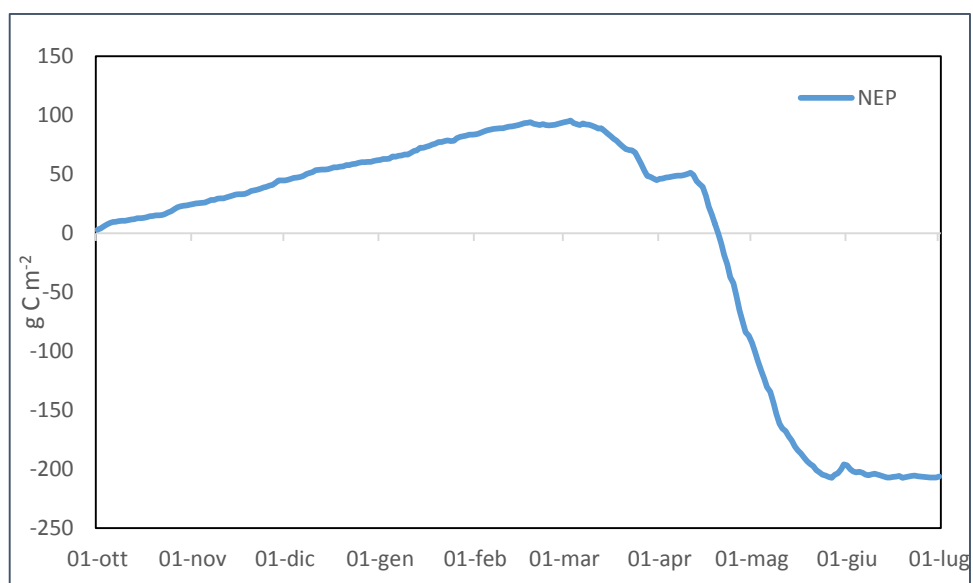
**Figura 42.** *Contenuto idrico del suolo stagione 2011-2012 sito IT-Ro4*

Durante la stagione produttiva 2011-2012 si è registrato nei mesi invernali di dicembre, gennaio e febbraio, un lungo periodo di temperature medie minime sotto gli zero gradi, con periodi siccitosi che hanno fatto in modo che la coltura di trifoglio incarnato ha manifestato un netto ritardo di ripresa vegetativa accusando le gelate invernali (morte delle piante) e difficoltà di crescita a causa della mancanza di acqua nel momento della ripresa vegetativa. Si può osservare dalla Fig.43, come l'andamento della NEE abbia un lungo periodo di flusso positivo (source), questo range va dalla lavorazione del terreno (ottobre) fino alla seconda metà di marzo, dove c'è stata forte ripresa della coltura, grazie alle temperature medio massime sopra la norma (2.8 °C Fig.40). Tuttavia il grafico della NEE ci mostra come nella prima decade di aprile a causa di copiose precipitazioni (pari a 40 mm) (Fig. 41), ha favorito il rallentamento dell'attività fotosintetica, facendo prevalere la respirazione eterotrofa del suolo, rilascio di carbonio nell'ambiente. Passato questo periodo critico la coltura si è ripresa, continuando il ciclo produttivo e assimilando carbonio per la fotosintesi (valori negativi, sink), fino alla completa maturazione della granella avvenuta nella seconda metà di giugno. La raccolta è stata effettuata tramite mietitrebbiatura il 1/07/2012, con produzioni pari a circa 200 kg SS ha<sup>-1</sup>.



**Figura 43.** Andamento della NEE registrata dalla stazione EC durante il ciclo colturale 2011-2012.

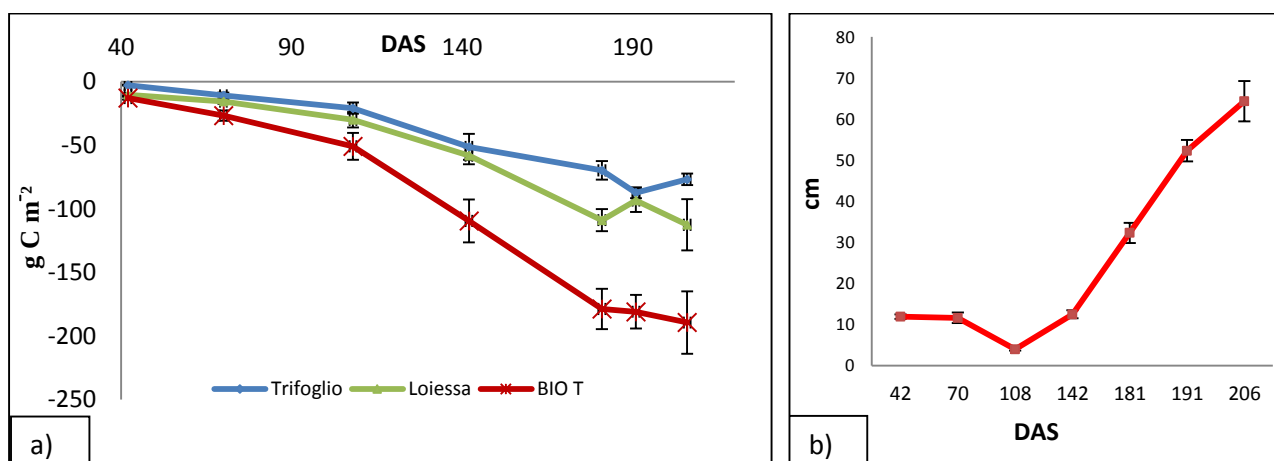
La Fig.44 mostra l'andamento del NEP colturale, nonostante i problemi climatici affrontati dalla coltura in questa stagione, il trend è stato negativo pari a  $-206.4 \text{ g C m}^{-2}$  (periodo 1/10/2011-1/07/2012).

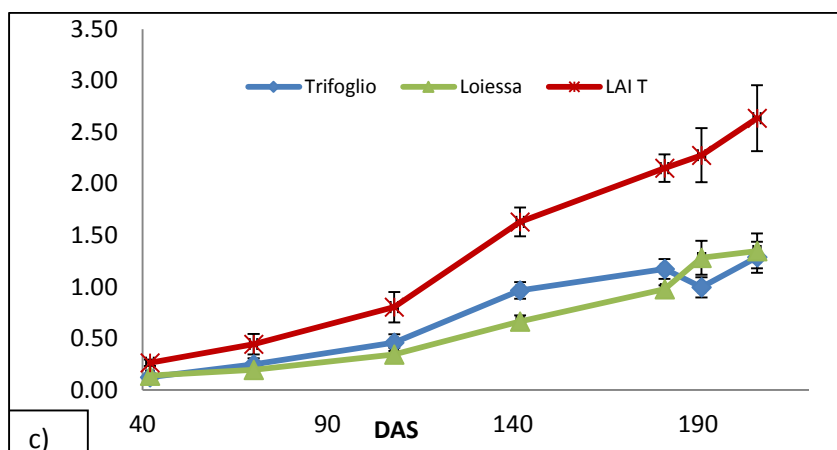


**Figura 44.** NEP cumulativa coltura trifoglio incarnato IT-Ro4 annata agraria 2011-2012..

#### 4.1.4. Stagione culturale 2012-2013

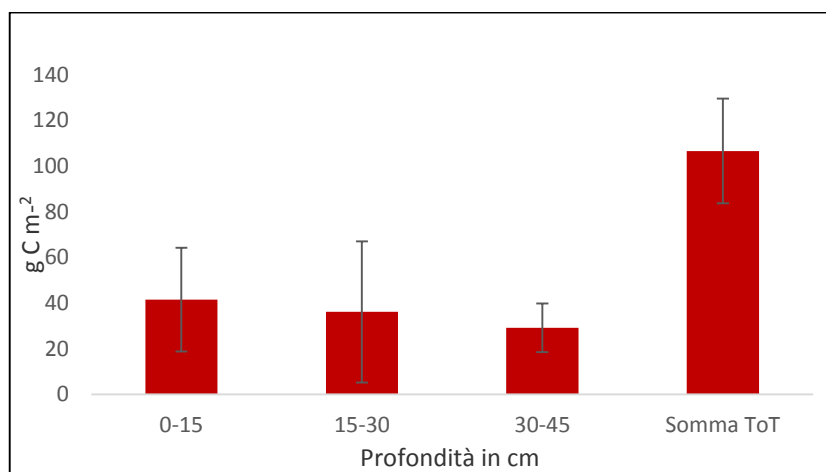
Durante questo periodo sono stati seguiti due campi sperimentali entrambi coltivati con erbai autunno primaverili. Il primo (IT-Ro3), è stato coltivato con un erbaio di trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.) consociato con loiessa (*Lolium italicum* L.) destinato alla produzione di fieno per l'alimentazione dei bovini aziendali. La quantità di semente utilizzata è stata pari a circa 30 kg ha<sup>-1</sup> di trifoglio e 15 kg ha<sup>-1</sup> di loiessa per un totale di 45 kg ha<sup>-1</sup>, seminata 8/10/2012. La raccolta è stata effettuata tra il 20 e il 22/05/ 2012 con una produzione di circa 7000 kg ha<sup>-1</sup> di sostanza secca. Il secondo (IT-Ro4), è stato coltivato con un erbaio di avena (*Avena sativa* L.) e veccia (*Vicia sativa* L.) per la produzione di fieno. La quantità di seme è stata pari 60 kg ha<sup>-1</sup> per la veccia e 60 kg ha<sup>-1</sup> per il trifoglio per un totale di 120 kg ha<sup>-1</sup>, seminata con seminatrice universale il 9/10/2012. La raccolta del fieno è avvenuta tra il 20 e il 22/05/2013, con una produzione di sostanza secca pari a 7000 kg ha<sup>-1</sup>. Sono stati effettuati complessivamente 7° campionamenti di biomassa (Fig.45a), l'ultimo rilievo raccolto in data 3/05/2013 a 206 giorni dalla semina e due settimane prima della sfalcio è quello che ci fornisce il dato maggiore di biomassa, pari a  $189,3 \pm 24,5$  g C m<sup>-2</sup>. La coltura ha subito durante il periodo di aprile delle incursioni da parte di cinghiali e bovini, che hanno superato le recinzioni, pascolando parti del sito, determinando una lieve diminuzione della biomassa raccolta nel 5° e 6° campionamento. Tuttavia ai fini della produzione di fieno, le perdite di biomassa causate dagli animali non hanno influito sulla raccolta finale del prodotto.





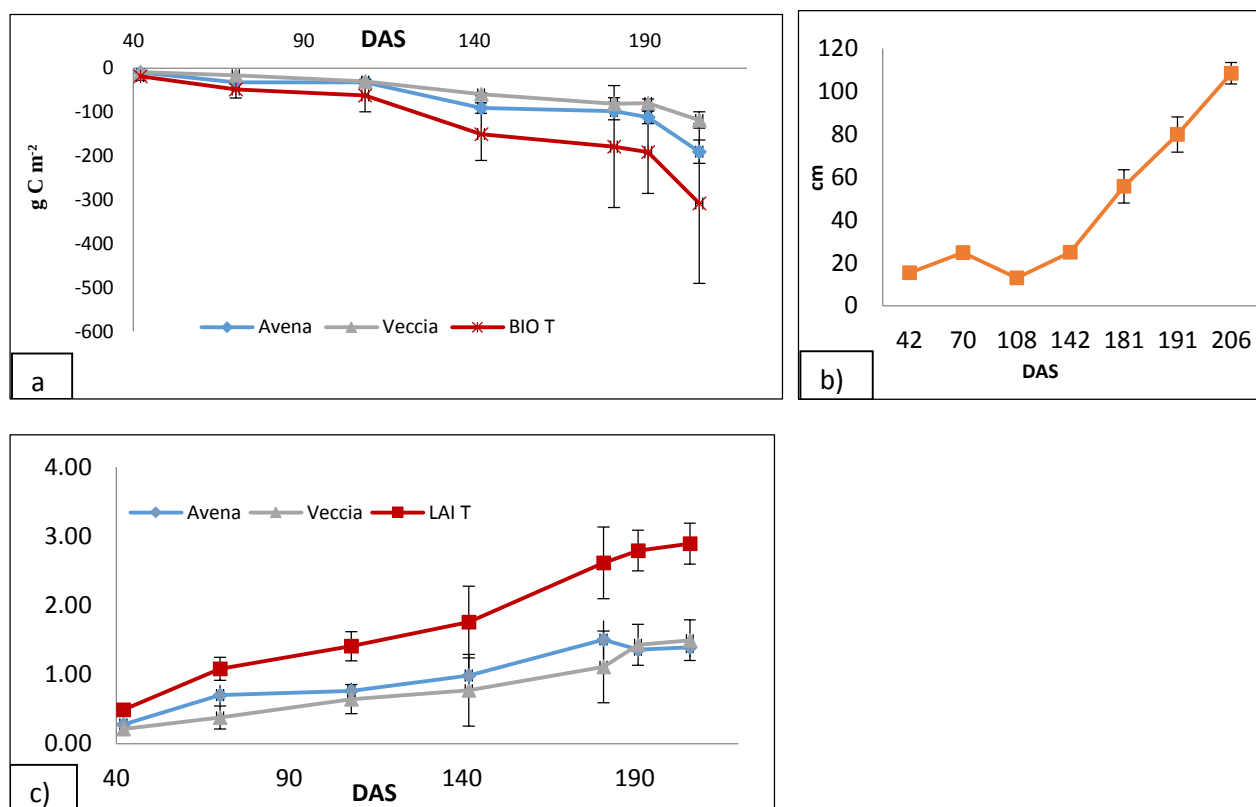
**Figura 45.** Grafici relativi alla stagione produttiva 2012-2013, erbaio trifoglio incarnato e loiessa campo sperimentale IT-Ro3 a) Biomassa b) Canopy c) LAI

La superficie fogliare maggiore della coltura (LAI) è stata registrata nel ultimo rilievo pari a  $2,6 \pm 0,6$  il 3/05/2013 con le specie vegetali nella fase di pre-fioritura (Fig. 45c). Così come l'altezza della coltura pari a  $64,4 \pm 4,9$  cm. Nella data del 25/01/2013, dopo 108 giorni dalla semina, in corrispondenza de 3° rilievo di biomassa, la coltura ha subito un danneggiamento da parte dei cinghiali, che hanno pascolato diverse zone dell'erbaio determinando una leggera diminuzione dell'altezza (Fig. 45b). La Fig.46 illustra il rilievo dei campionamenti di radici effettuato nell'erbaio nel sito IT-Ro3. Si può notare dal grafico come le radici raccolte nei strati superficiali di 0-15 cm e 15-30 cm possiedono un contenuto medio di radici pari a  $41,4 \pm 22,7$  g C m<sup>-2</sup> e  $36,1 \pm 30,9$  g C m<sup>-2</sup> di radici, con una notevole deviazione standard rispetto ai campionamenti effettuati negli anni precedenti. Contenuto totale di radici lungo il profilo 0-45 cm è stato pari a  $106,6 \pm 22,9$  g C m<sup>-2</sup>.



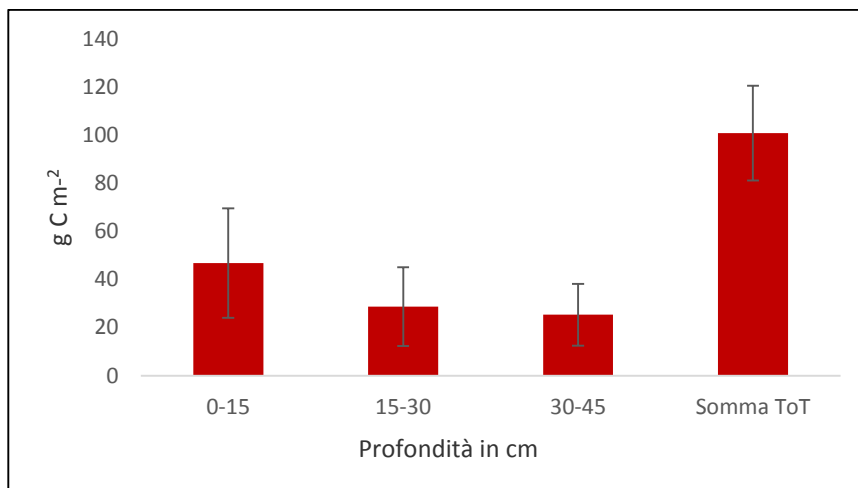
**Figura 46.** Grafico relativo alla raccolta delle radici nel sito IT-Ro3 stagione 2012-2013 erbaio consociato di trifoglio incarnato e loiessa.

Nel sito di ricerca IT-Ro4, era presente un erbaio consociato dalle due specie vegetali avena (*Avena fatua* L.) e veccia (*Vicia sativa* L.). La Fig. 47a ci permette di osservare l'andamento della biomassa colturale. Sono stati effettuati 7° rilievi di biomassa, l'ultimo campionamento il 3/05/2013 ci fornisce il dato maggiore registrato durante l'analisi di crescita pari a  $308,1 \pm 181,9 \text{ g C m}^{-2}$ .



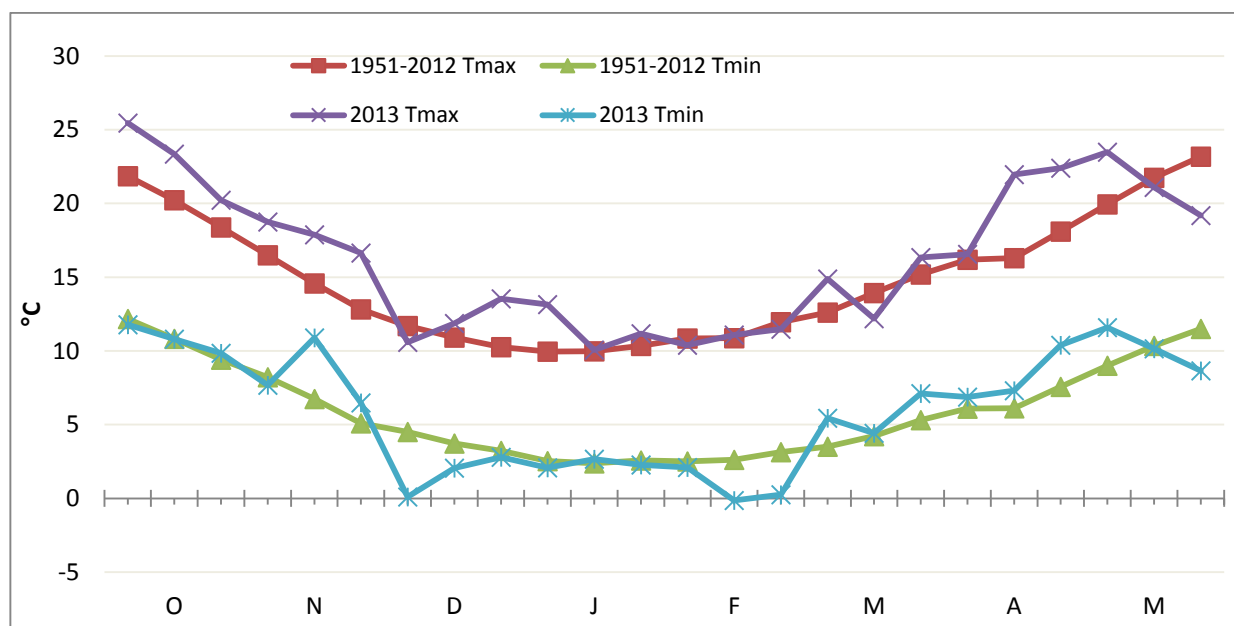
**Figura 47.** Grafici relativi alla stagione produttiva 2012-2013, erbaio Avena Veccia campo sperimentale IT-Ro4 a) Biomassa b) Canopy c) LAI

Il LAI totale registrato il 3/05/2013 in corrispondenza del 7° campionamento di biomassa è stato pari a  $2,89 \pm 0,3$  (Fig. 47c). Mentre il grafico dell'andamento della canopy ci fa osservare come l'altezza massima dell'erbaio è stata raggiunta a 206 giorni dalla data di semina, corrispondente al 3/05/2013 pari a  $108,3 \pm 4,8 \text{ cm}$ . Durante il 3° rilievo di biomassa si può osservare come la canopy è diminuita a causa di un lieve pascolamento e calpestamento avvenuto nei giorni a ridosso del 3° campionamento, 25/05/2013 causato da dei bovini scappati dalla recinzione aziendale (Fig. 47b). La Fig. 48, illustra il rilievo dei campionamenti di radici effettuato nell'erbaio nel sito IT-Ro3. Si può notare dal grafico come le radici raccolte nei strati superficiali di 0-15 cm e 15-30 cm possiedono un contenuto medio di radici pari a  $41,4 \pm 22,7 \text{ g C m}^{-2}$  e  $36,1 \pm 30,9 \text{ g C m}^{-2}$  di radici, con una notevole deviazione standard rispetto ai campionamenti effettuati negli anni precedenti. Contenuto totale di radici lungo il profilo 0-45 cm è stato pari a  $106,6 \pm 22,9 \text{ g C m}^{-2}$ .

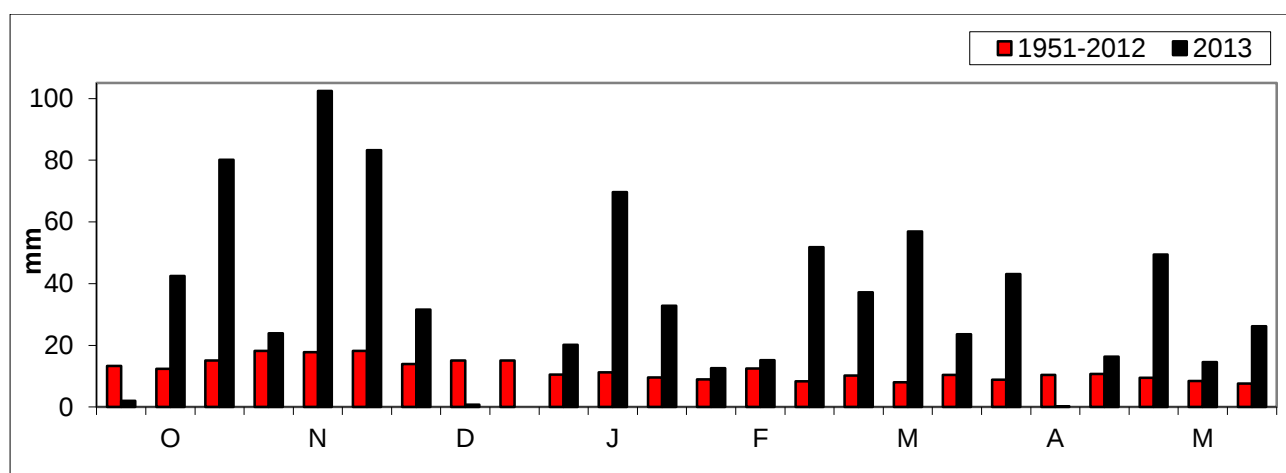


**Figura 48.** Grafico relativo alla raccolta delle radici nel sito IT-Ro4 stagione 2012-2013 erbaio consociato di avena vecchia

L'andamento delle temperature nell'annata agraria 2012-2013 (Fig.49) ci mostra che l'inverno è stato mite, con una temperatura media massima pari a circa 2.4°C maggiore rispetto alla media storica del periodo di riferimento 1951-2011. Le temperature medie minime hanno seguito l'andamento della serie storica tranne che nella prima decade di dicembre con temperature minime prossime allo 0°C. Anche il mese di aprile è stato caratterizzato da una media di temperature medie massime particolarmente caldo pari a 4.5°C rispetto alla media storica. Queste temperature miti associate ai rovesci copiosi di questa annata hanno favorito la crescita rigogliosa degli erbai, favorendo le produzioni di sostanza secca. Le piogge durante il periodo colturale sono state pari a 837 mm, concentrandosi soprattutto durante l'inverno con punte pari a 100 mm di pioggia nella seconda decade di novembre, e di 80 mm nella terza decade. Anche nella primavera 2013 le piogge sono state copiose, particolarmente nelle prime due decadi di marzo, 37.2 mm e 57.9 mm, e l'ultima di aprile 49.4 mm. La media storica delle precipitazioni riferite allo steso periodo era pari a 284.8 mm. Dunque questo anno è stato particolarmente piovoso superando di circa 552 mm tale media (Fig. 50).

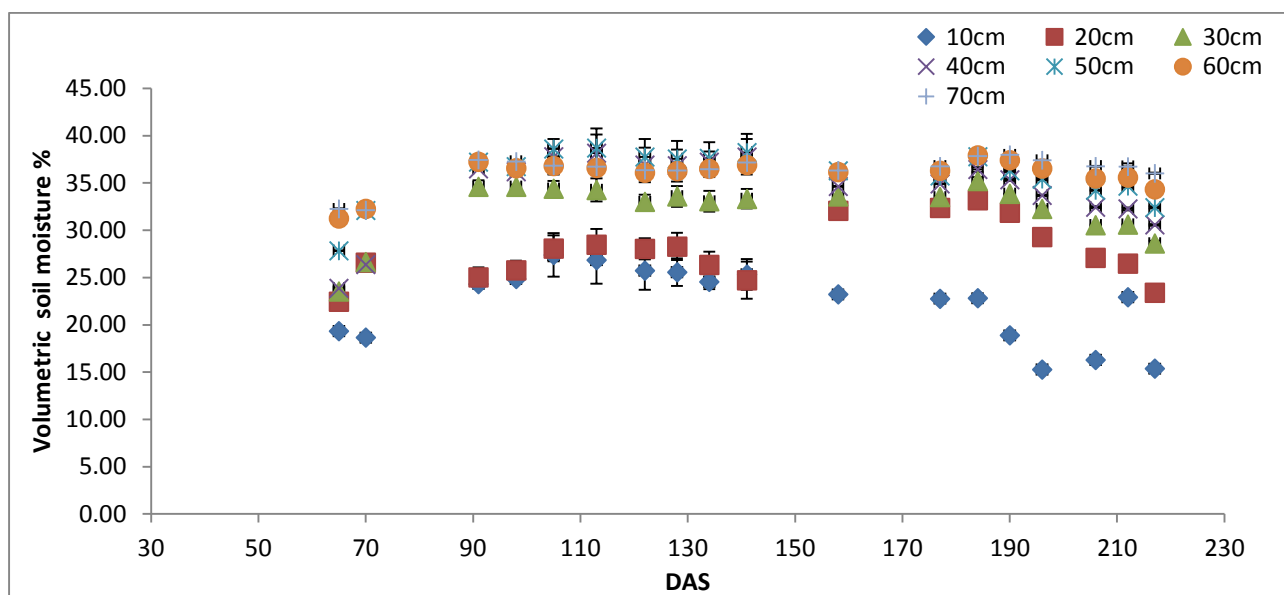


**Figura 49.** Andamento termico, annata agraria 2012-2013 delle temperature medio massime e minime del sito di Roccarespampani (VT), confrontate con la serie storica 1951-2010



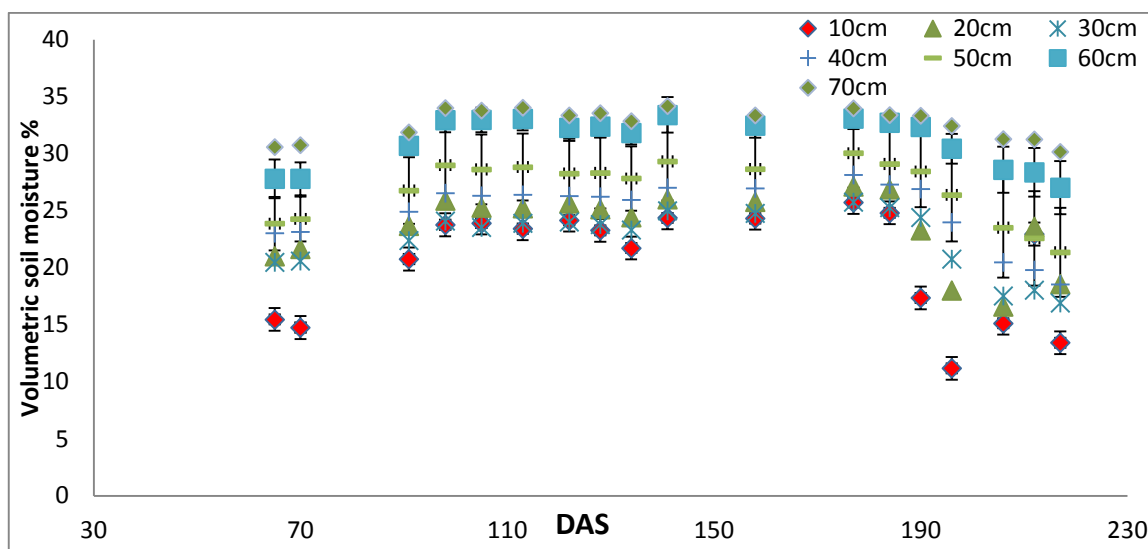
**Figura 50.** Andamento pluviometrico storico e stagionale annata agraria 2012-2013.

Nella stagione culturale 2012-2013 i rilievi di umidità del suolo sono stati eseguiti in tutti e in due gli appezzamenti, IT-Ro3 (Fig.51) e IT-Ro4 (Fig. 52).



**Figura 51.** *Contenuto idrico nel suolo, sito IT-Ro3, stagione 2012-2013 rilevato con le sonde Sentek e Diviner 2000*

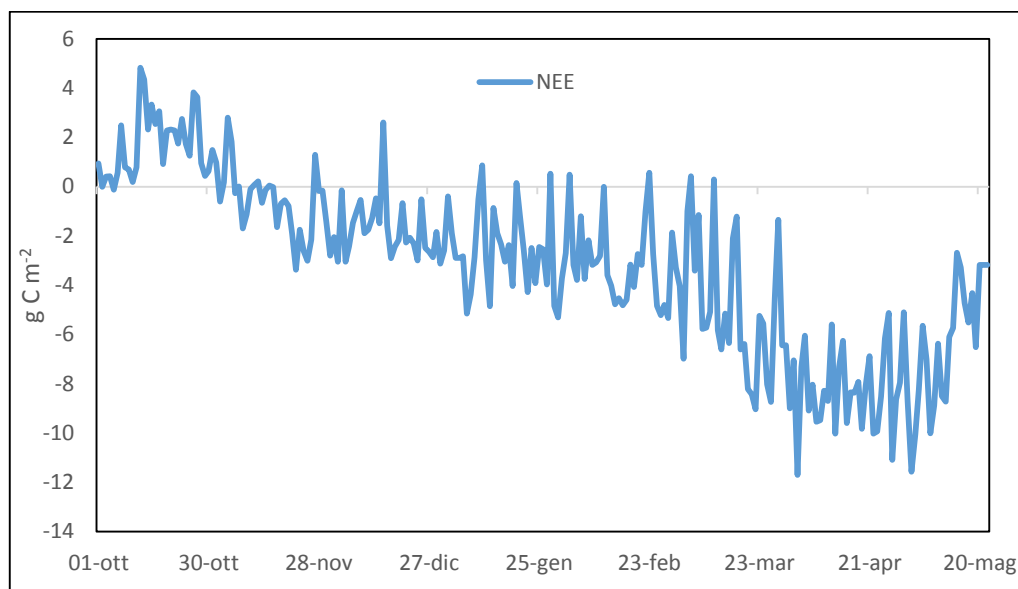
Durante il ciclo produttivo della coltura di erbaio consociato di trifoglio incarnato e loiessa (IT-Ro4), si nota una certa uniformità di contenuto idrico negli strati più profondi da 40 a 70 cm dopo 80 giorni dalla semina avvenuta il 9/10/2012 fino alla data di sfalcio il 20/05/2013 a circa 230 giorni dalla semina. Mentre gli strati superficiali mostrano maggiore variabilità nel contenuto idrico perché interessati maggiormente dall'assorbimento da parte delle radici della coltura durante la fase vegetativa (marzo-aprile-maggio) e dagli apporti idrici naturali soprattutto nel periodo primaverile. Lo strato 0-10 cm ha avuto un contenuto idrico durante il ciclo colturale medio pari a  $25,32 \pm 1,22 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  per la prima parte di stagione fino a marzo 2013, per poi vedersi ridurre il contenuto idrico al  $19,22 \pm 0,09 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  da fine marzo alla raccolta avvenuta il 20 maggio. Lo strato 10-20 cm per la prima parte della stagione dalla semina a fine marzo medio di  $27,8 \pm 0,92 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , mentre nella seconda parte della stagione produttiva dalla fine di marzo a 177 giorni dalla semina fino allo sfalcio e raccolta del fieno il contenuto idrico medio è stato pari a  $28,78 \pm 0,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Dall'analisi dei dati abbiamo escluso i primi due rilievi effettuati a 65 e 70 giorni dalla semina perché pozzetti di misura della sonda Sentek in PVC installati nel terreno necessitavano un periodo di aggiustamento, a causa dello slurry utilizzato per l'inserimento degli stessi tubi nel suolo, per effettuare le misure con gli strumenti Diviner 2000 e SoloPorter. Il secondo erbaio autunno-vernino seguito nella stagione produttiva 2012-13 nel sito di ricerca IT-Ro4, era stato coltivato con avena e veccia. La Fig. 52, illustra l'andamento del contenuto idrico rilevato negli strati 0-70 cm ad intervalli di 10 cm con le sonde Sentek.



**Figura 52.** Contenuto idrico nel suolo, sito IT-Ro4, stagione 2012-2013 rilevato con le sonde Sentek e Diviner 2000

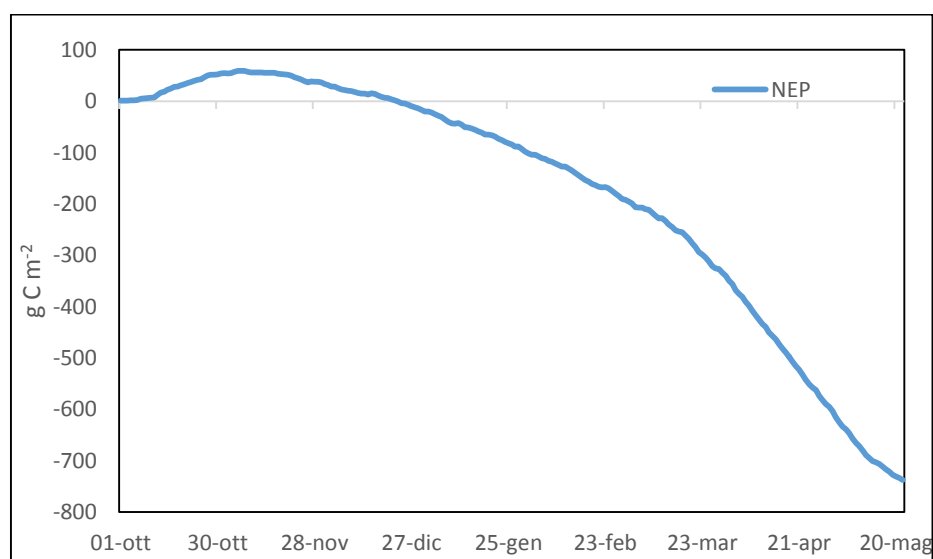
Si nota come gli strati più profondi, da 40 a 70 cm, hanno un andamento regolare che cambia molto poco, tranne che in prossimità del periodo in cui le colture sono maggiormente attive (marzo-aprile-maggio) da 150 gironi dalla semina fino al raccolto. Gli strati superficiali interessati dalla penetrazione e assorbimento delle radici colturali (0-30 cm) subiscono un andamento del contenuto idrico più fluttuante. A 177 giorni dalla semina, il contenuto medio di umidità alla profondità 0-10 cm è stato di  $23,56 \pm 3,08 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , per poi scendere a  $17,48 \pm 3,24 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  nel periodo dal 184 DAS fino alla raccolta. Anche lo strato 10-20 cm si riscontra un andamento simile con contenuto medio di umidità fino a 184 DAS (fine marzo)  $25,44 \pm 2,39 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  a  $21,03 \pm 2,55 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  nella seconda parte della stagione. Così come la profondità 20-30 cm un contenuto pari a  $24,07 \pm 1,8 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  nella prima parte della stagione fino ad arrivare a fine ciclo pari a  $20,49 \pm 1,6 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Profondità 30-40 cm  $26,49 \pm 2,02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  a 184 DAS per poi scendere a  $22,45 \pm 2,24 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Queste fluttuazioni di umidità sono dovute all'assorbimento da parte delle radici della coltura, che trovandosi nella fase di maggiore sviluppo vegetativo del ciclo, all'aumento della temperatura media massima dell'aria che nel periodo primaverile aumenta l'evapotraspirazione nel sito, questo si riscontra maggiormente negli strati superficiali a differenza degli strati inferiori dove le fluttuazioni sono minori. La Fig.53 illustra l'andamento della NEE nel sito IT-Ro3 nella stagione produttiva 2012-2013. Da una prima osservazione si nota che il flusso di NEE è caratterizzato da diversi picchi che fanno oscillare il flusso di carbonio giornaliero del sito di ricerca. Questi "spike" corrispondono agli eventi piovosi che si sono verificate abbondantemente durante il ciclo colturale, soprattutto nei mesi di novembre e maggio, apportando ingenti quantitativi idrici che hanno favorito la respirazione del suolo e una forte crescita di erbe infestanti. Si nota dal grafico che appena subito la semina dell'erbaio, avvenuta il

9/10/2012), l'agro-ecosistema ha dapprima un trend positivo di NEE, fino alla fine di ottobre, poi a causa alle copiosi piogge e alle temperature miti (temperatura medie dell'aria di 2°C maggiore rispetto alla media storica del medesimo periodo) il trend di flusso si è invertito in negativo (sink) grazie alla maggiore attività fotosintetica, dapprima delle erbe infestanti e poi dell'erbaio di trifoglio incarnato e loiello.



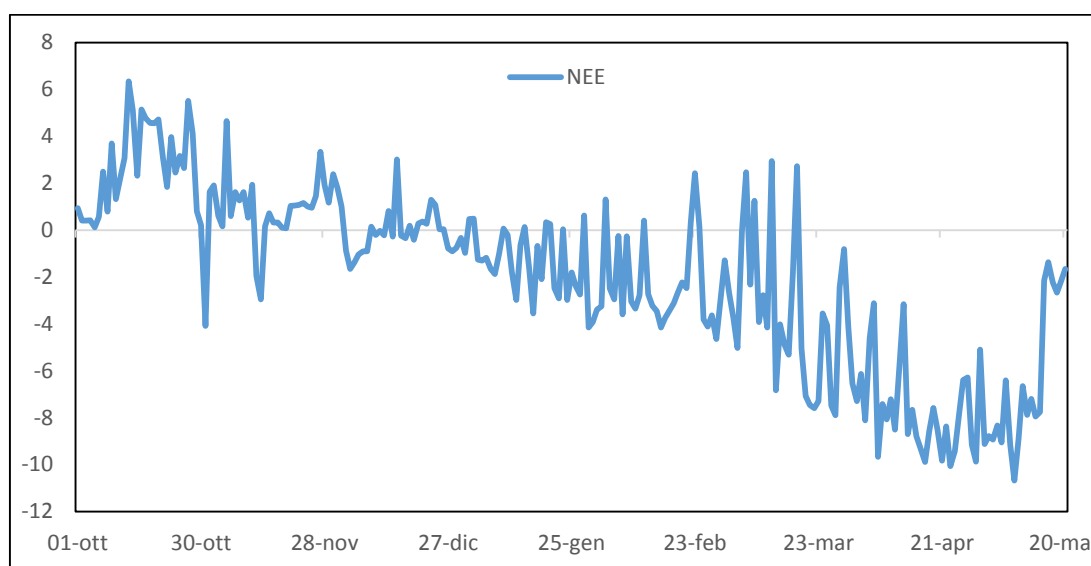
**Figura 53.** Andamento della NEE registrata dalla stazione EC durante il ciclo colturale 2012-2013 nell'erbaio trifoglio incarnato-loiello nel campo sperimentale IT-Ro3.

L'andamento della NEP, (Fig.54) registrato in campo dalla stazione EC, nel periodo 1/10/2012-22/05/2013 è stato pari a un valore complessivo di 784,8 g C m<sup>-2</sup>



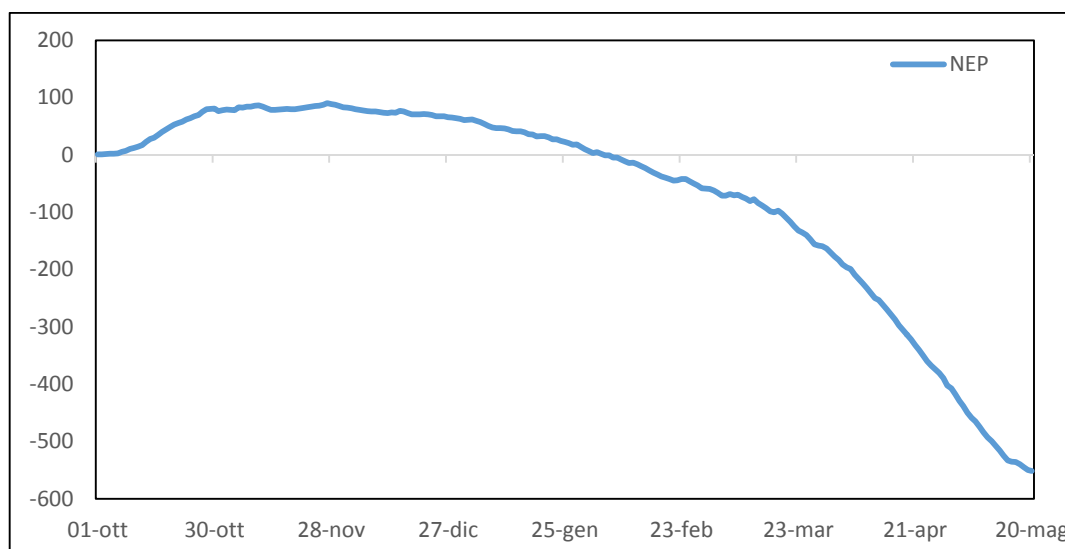
**Figura 54.** NEP cumulativa coltura erbaio trifoglio incarnato-loiello campo sperimentale IT-Ro3.

La Fig.55, mostra la NEE registrata dalla stazione EC nel sito IT-Ro4 nella stagione produttiva 2012-2013. Da una prima osservazione si nota che il flusso di NEE è caratterizzato anche in questo caso da diversi picchi, dovuto agli eventi piovosi. In linea di massima anche l'andamento di NEE nel ciclo colturale dell'erbaio di avena-veccia tende a comportarsi come nell'erbaio precedentemente descritto nel sito IT-Ro3. Il periodo di maggiore accumulo di carbonio è stato nei mesi di aprile e maggio, caratterizzato da temperature miti.



**Figura 55.** Andamento della NEE registrata dalla stazione EC durante il ciclo colturale 2012-2013 nell'erbaio avena-veccia nel campo sperimentale IT-Ro4.

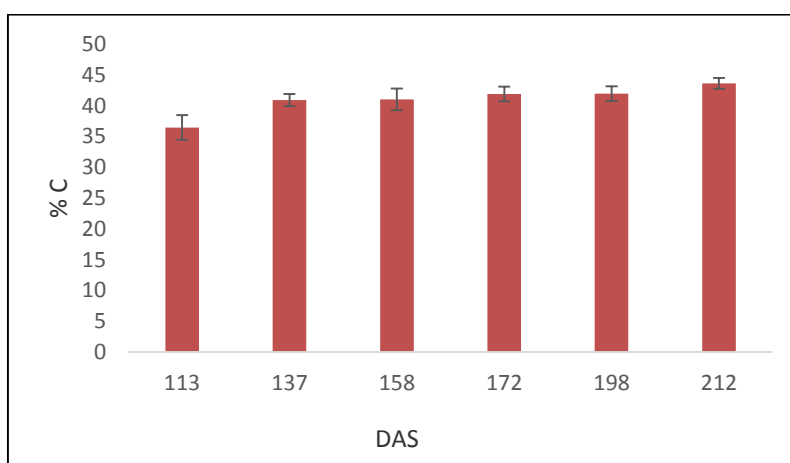
La NEP cumulativa del periodo 1/10/2012-20/05/2013 registrato per la coltura di erbaio di avena-veccia nel sito sperimentale IT-Ro3 e raffigurato dal grafico nella Fig.56. Il valore di NEP è stato pari a 553.8 g C m<sup>-2</sup>. Tutti i valori di NEP saranno utilizzati per la stima del bilancio del carbonio (NECB).



**Figura 56.** NEP cumulativa coltura erbaio avena-veccia campo sperimentale IT-Ro4.

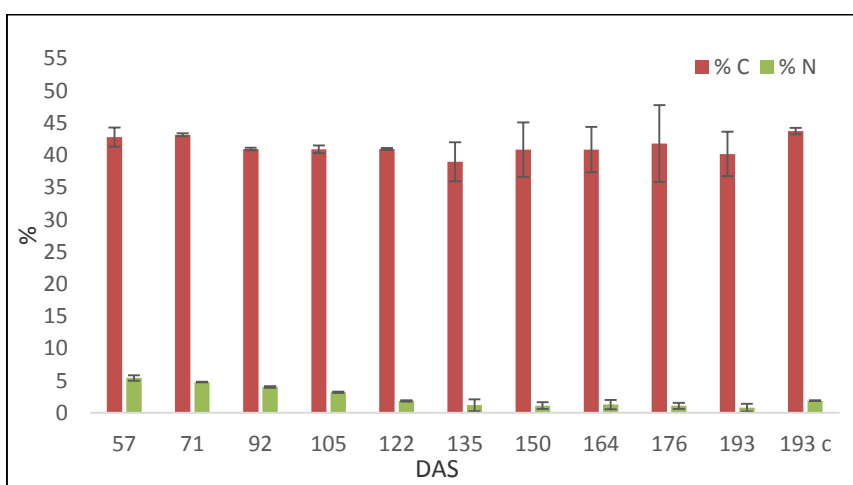
## 4.2. Contenuto di C e N nei campioni vegetali

Nel presente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dalle analisi della biomassa epigea (foglie, steli e in alcuni casi semi) delle colture, effettuate con l'Analizzatore Elementare Flash EA1112 (Thermo Electron Corporation Usa). La Fig. 57, mostra il contenuto in percentuale di carbonio nella coltura di trifoglio incarnato, coltivato nella stagione colturale 2009-10. Sono stati effettuati 7 rilievi e nell'ultimo campionamento a 212 giorni dopo la semina della coltura, si è registrato il contenuto maggiore di C pari a  $43,6 \pm 0,9$  %.



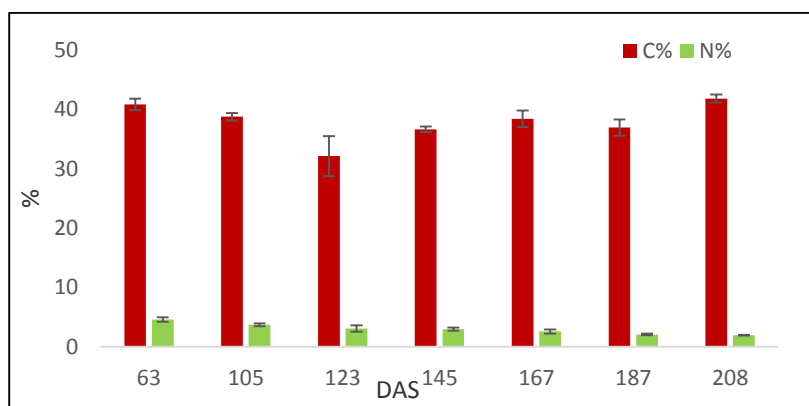
**Figura 57.** Contenuto di carbonio rilevato tramite l'analizzatore elementare durante l'annata agraria 2009-10 sulla coltura di trifoglio incarnato.

La Fig. 58 illustra i risultati ottenuti nell'annata agraria 2010-11 sulla coltura di frumento duro. In questo caso è stato determinato anche il contenuto di N e la percentuale di C e N nella granella raccolta come prodotto finale, indicato nel grafico con il riferimento 193 c. Si può notare come il contenuto di N negli organi vegetali sia diminuito dal  $5,4 \pm 0,4$  % del primo rilievo registrato a 57 giorni dopo la semina, fino a valori inferiori a 1, pari a  $0,79 \pm 0,6$  % nell'ultimo rilievo a 193 giorni dopo la semina. Il carbonio si è mantenuto costante per l'intero periodo analizzato con valori intorno al 40% ed ottenendo il valore più alto nell'ultimo rilievo a 193 giorni dalla semina sulla granella con un valori pari a  $43,75 \pm 0,5$  %.



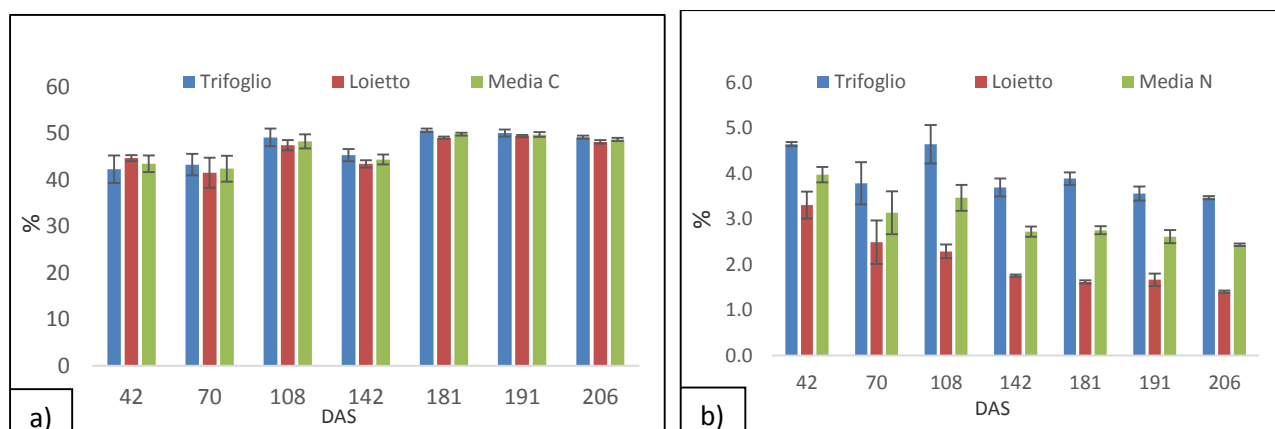
**Figura 58.** *Contenuto di carbonio e azoto rilevato tramite l'analizzatore elementare durante l'annata agraria 2010-11 sulla coltura di frumento duro.*

Nell'annata agraria 2011-12 è stato coltivato trifoglio incarnato i risultati ottenuti con l'analizzatore elementare sulla concentrazione di C e N sono illustrati dalla Fig. 59. In questo caso sono stati effettuati 7 rilievi, l'ultimo rilievo a 208 giorni dalla semina (DAS), è risultato avere la maggiore concentrazione di C pari a  $41,9 \pm 0,7$  % e la minore concentrazione di N,  $1,9 \pm 0,06$  %. Mentre la più alta concentrazione di N è stata determinata nel primo campionamento a 63 DAS con un valore pari a  $4,6 \pm 0,04$  %.



**Figura 59.** *Contenuto di Carbonio e Azoto rilevato tramite l'analizzatore elementare durante l'annata agraria 2011-12 sulla coltura di trifoglio incarnato.*

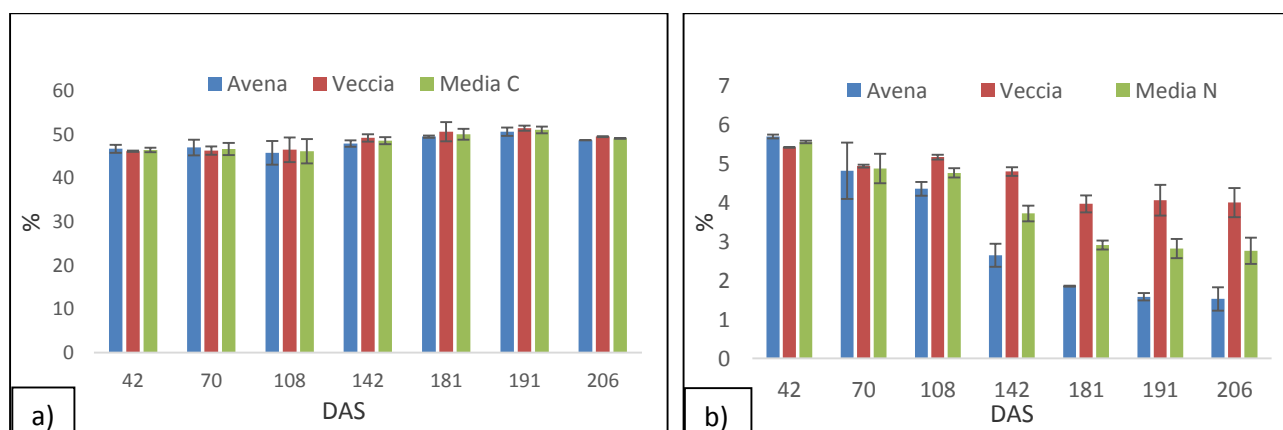
La Fig. 60a mostra l'andamento della percentuale di C analizzata nell'erbaio di trifoglio incarnato e loietto della stagione colturale 2012-13 del sito IT-Ro3, mentre la Fig. 60b mostra i risultati della concentrazione in percentuale di N dello stesso erbaio. Dal grafico a) si può notare come le due colture abbiano un contenuto medio di C simile, con il valore più alto registrato durante il sesto rilievo a 191 giorni dalla semina, pari a  $49,9 \pm 0,3$  %, rispettivamente con valori pari a  $50,7 \pm 0,4$  % per il trifoglio e  $49,1 \pm 0,2$  % per il loietto. Dalla Fig. 48b si nota come l'andamento del contenuto di N nelle due specie vegetali è variabile, soprattutto nel trifoglio, con la percentuale maggiore registrata nel 3° rilievo, a 108 giorni dalla semina pari a  $4,6 \pm 0,4$  %, mentre il loietto ha fatto registrare il contenuto maggiore di N nel 1° rilievo a 42 giorni dalla semina pari a  $3,3 \pm 0,3$  %. Tuttavia il contenuto maggiore di N registrato nell'intero erbaio è stato pari a  $4,0 \pm 0,2$  % a 42 giorni dalla semina.



**Figura 60.** *Risultati analizzatore elementare erbaio IT-Ro3 trifoglio incarnato loietto 2012-13 a) contenuto di carbonio b) contenuto di azoto.*

La Fig. 61a mostra l'andamento della percentuale di C analizzata nell'erbaio consociato tra avena e veccia annata agraria 2012-13 sito IT-Ro3, mentre la Fig. 61b mostra i risultati della concentrazione

in percentuale di N dell'erbaio. Osservando la Fig. 61a si nota come le due colture abbiano un contenuto medio di C simile, con concentrazione più alta registrata durante il 6° rilievo a 191 giorni dalla semina, ed un valore medio di C dell'erbaio pari a  $51,1 \pm 0,8$  %, con valore medio per l'avena pari a  $50,7 \pm 0,9$  % e per la veccia di  $51,5 \pm 0,6$  %. La Fig. 61b mostra come l'andamento del contenuto di N nelle due specie vegetali sia variabile. Nonostante il fatto che il contenuto medio maggiore si riscontra nel 1° rilievo con un valore pari a  $5,5 \pm 0,1$  %, con avena  $5,5 \pm 0,1$  % e veccia  $5,4 \pm 0,1$  %, l'avena diminuisce nel tempo il suo contenuto di N con una concentrazione minima registrata nel 7° e ultimo rilievo pari a  $1,5 \pm 0,2$  %. A differenza della veccia che si mantiene costante nei rilievi, fino ad un minimo  $3,9 \pm 0,2$  % rilevato nel 4° campionamento a 181 giorni dalla semina.

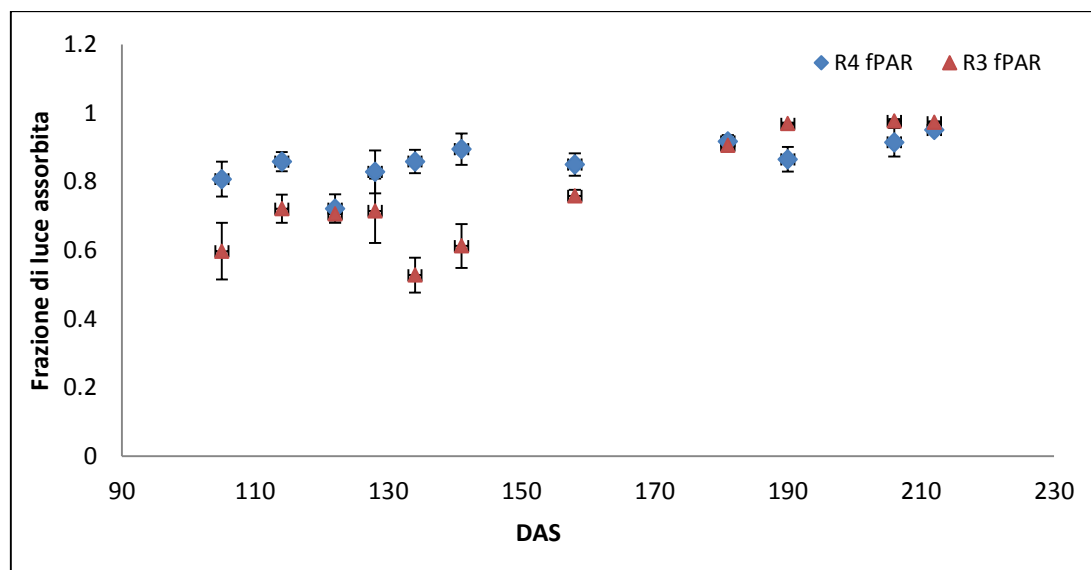


**Figura 61.** Risultati analizzatore elementare erbaio IT-Ro4 avena veccia 2012-13 **a)** contenuto di carbonio **b)** contenuto di azoto.

### 4.3. Radiazione fotosinteticamente attiva (fPAR)

La Fig. 62 mostra l'andamento della frazione di luce assorbita (fPAR), dagli erbai nei siti IT-Ro3 e IT-Ro4 nella stagione culturale 2012-2013 misurata con la strumentazione Sunscan. Si osserva come la distribuzione dei punti dei dati rilevati, segua l'andamento dell'accrescimento colturale, ma il 5° e campionamento rilevato sul sito IT- Ro3 (erbaio consociato di trifoglio incarnato e loietto italico ) nella data del 20/02/2013 a 135 giorni dalla data di semina, il valore di fPAR pari a  $0,58 \pm 0,1$  è più basso rispetto al campionamento precedente effettuato il 14/02/2013 pari a  $0,71 \pm 0,18$  (129 giorni dalla semina) a causa del pascolamento avvenuta sul sito da parte di bovini di razza maremmana (circa 40 capi) scappati dalle recinzioni aziendali. Tuttavia la produzione finale di biomassa non ha risentito di questo danneggiamento, in quanto la coltura si è ripresa egregiamente, grazie alla capacità di ricrescita del trifoglio e della loiessa nei primi stadi di accrescimento e dalle condizioni climatiche

favorevoli di marzo (temperature medie massime sopra la media e piogge copiose come riportato nel paragrafo 3.1.4).



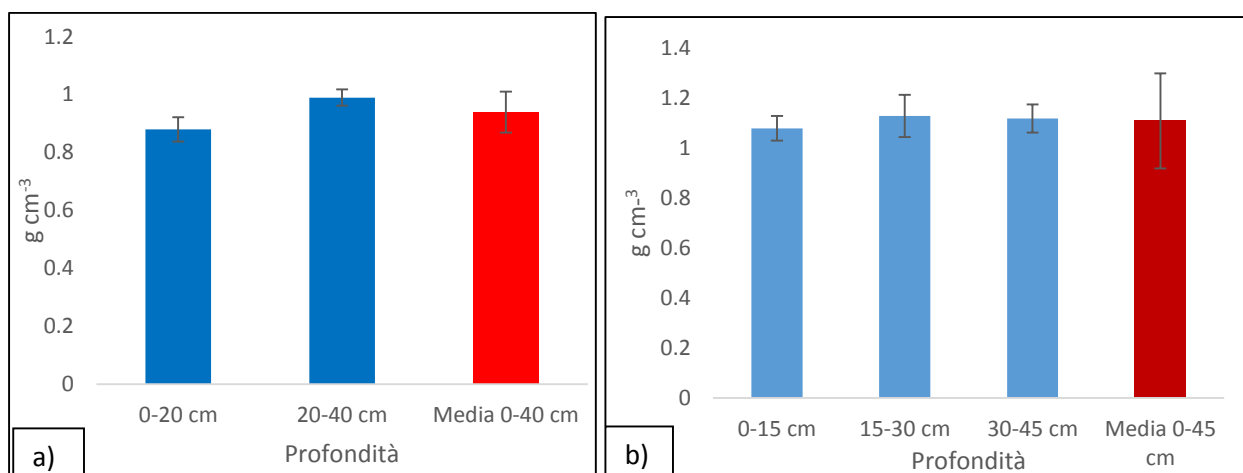
**Figura 62.** Grafico fPAR erbai ciclo colturale 2012-2013 nei campi di ricerca IT-Ro3; IT-Ro4.

#### 4.4. Risultati dei rilievi effettuati sul suolo

I rilievi sulle principali proprietà del suolo sono stati effettuati per caratterizzare agronomicamente i sistemi colturali e per ottenere informazioni utili anche come dati di input del modello DNDC per le simulazioni a livello di sito sperimentale.

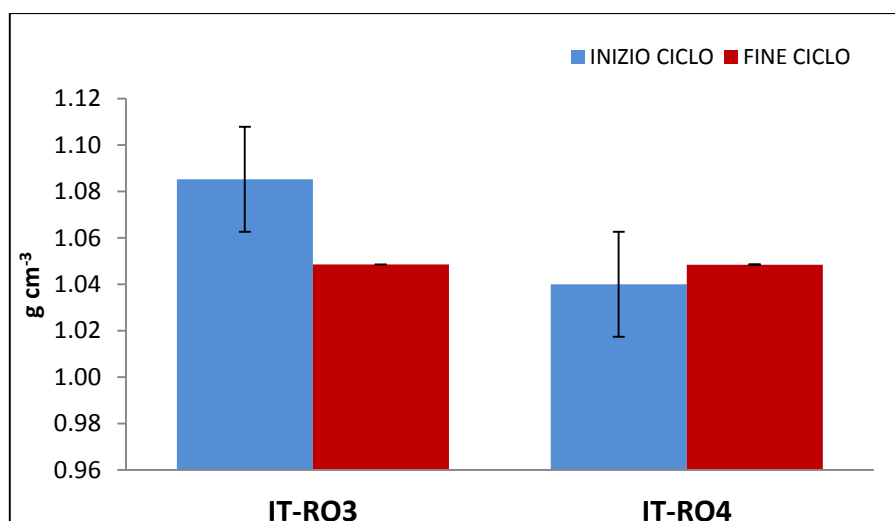
##### 4.4.1. Densità apparente

Per quanto riguarda la densità apparente, la Fig. 63a illustra i dati rilevati al rilievo effettuato ad inizio ciclo il 19/08/2010 nel campo IT-Ro3. Nella stagione 2010-2011 il campo è stato coltivato con frumento duro, e la preparazione del letto di semina è stata effettuata con un aratura profonda a 30 cm con aratro bivomere, successivamente seguita da erpicatura a 20 cm di profondità con erpice a dischi. Il valore medio misurato alla profondità 0-40 cm è stato pari a  $0.96 \text{ g cm}^{-3}$ . La Fig. 63b illustra i valori di densità apparente ottenuti a fine ciclo, rilevati il 20/07/2012 nella stagione 2011-2012 nel sito IT-Ro4 coltivato a trifoglio incarnato. La preparazione del letto di semina era stata effettuata tramite erpicatura con erpici a dischi, alla profondità di intervento di 20 cm. Il valore medio misurato alla profondità 0-45 cm è stato  $1.1 \text{ g cm}^{-3}$ .



**Figura 63.** Risultati densità apparente **a)** frumento duro 2010-2011 **b)** trifoglio incarnato 2011-2012

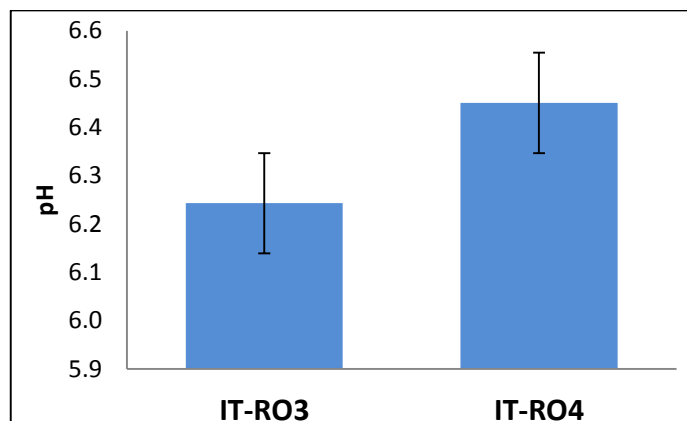
La Fig. 64 ci permette di valutare la densità apparente registrata ad inizio e fine ciclo colturale, durante l'annata agraria 2012-2013 negli appezzamenti di ricerca, coltivati entrambi ad erbaio autunno-primaverile. Il valore medio registrato ad inizio ciclo nello strato 0-45 cm nel sito IT-Ro3, è stato pari a 1.09 g cm<sup>-3</sup> campione rilevato in campo il 22/11/2012 mentre nel sito IT- Ro4 ad inizio ciclo il valore è stato pari a 1.04 g cm<sup>-3</sup> rilevato in campo 11/12/2012. A fine ciclo il valore per entrambi i siti è stato pari a 1.05 g cm<sup>-3</sup>, rilevati in campo rispettivamente il 20/08/2013 per il sito IT-Ro3 e il 5/07/2013 per il sito IT-Ro4.



**Figura 64.** Risultati densità apparente 2012-2013 nei siti di ricerca coltivati ad erbaio

#### 4.4.2. Reazione del terreno

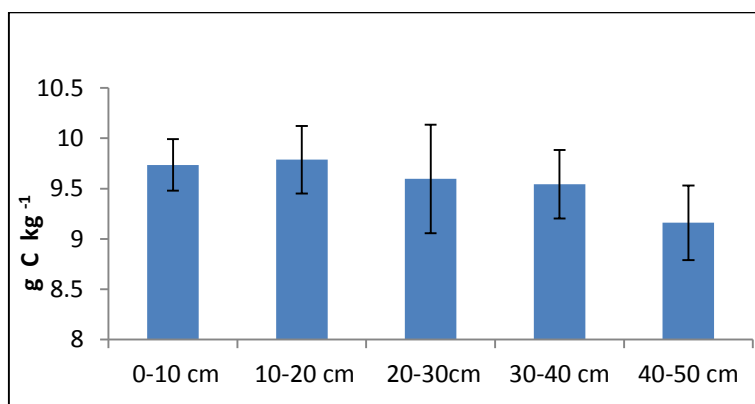
Il pH dei campi sperimentali è stato rilevato alla profondità 0-50 cm nell'annata agraria 2012-2013, essendo lo strato attivo esplorato dalle radici delle colture erbacee normalmente coltivate nei siti, il valore medio del terreno è risultato neutro-subacido valori pH 6.2 IT-Ro3, pH 6.5 IT-Ro4 (Fig.65).



**Figura 65.** Risultati analisi del pH sul sito sperimentale di ricerca nei due campi IT-Ro3; IT-Ro4.

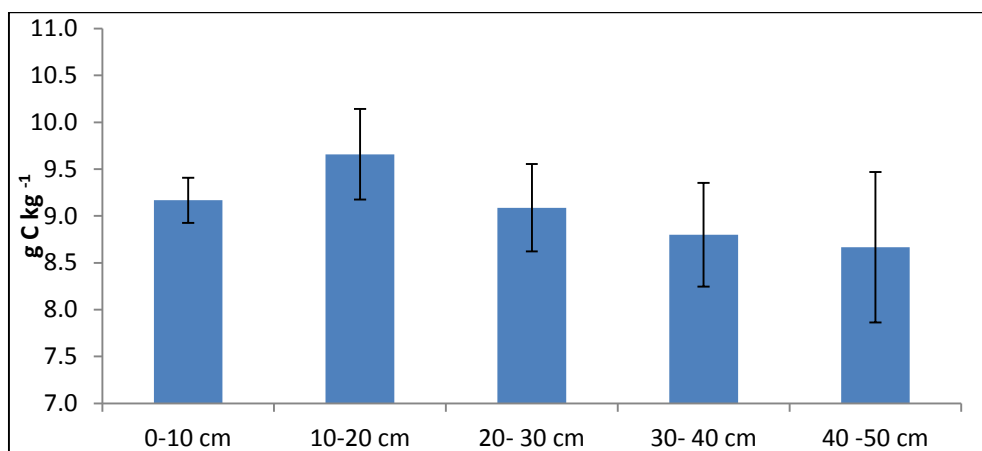
#### 4.4.3. Risultati delle analisi di carbonio organico del suolo

La Fig.66 mostra i risultati ottenuti dalle analisi del contenuto di carbonio organico del suolo, per la stagione 2010-2011 nel sito IT-Ro3, coltivato a frumento duro. Il campionamento del terreno è stato effettuato il 19/08/2010. Il contenuto medio di carbonio organico rilevato nella profondità 0-50 cm è stato pari a 9,788 g C Kg<sup>-1</sup>.



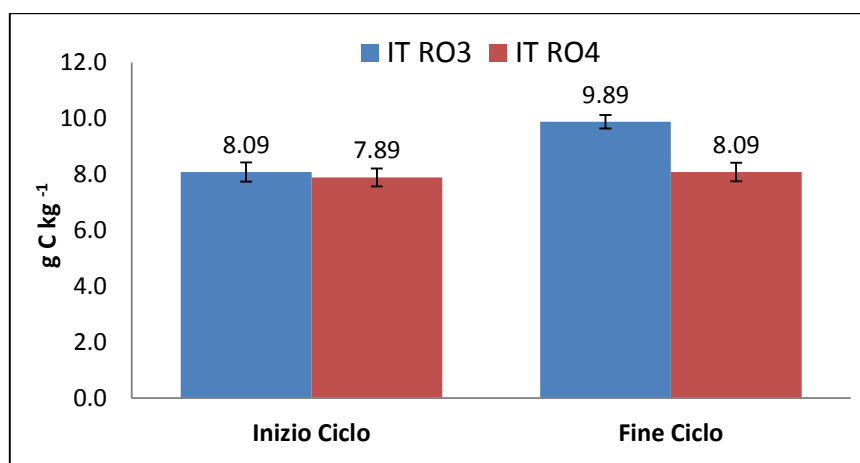
**Figura 66.** Contenuto di carbonio organico nel suolo, profilo di terreno investigato 0-50 cm, annata agraria 2010-2011 coltura frumento duro.

I risultati delle analisi del carbonio organico ottenute sulla coltura di trifoglio incarnato annata agraria 2011-2012, sono illustrate nella Fig.67. La profondità investigata è stata tra 0 e 50 cm, (intervalli di 10 cm a strato) il valore medio registrato è stato pari a  $8,979 \text{ g C kg}^{-1}$



**Figura 67.** *Contenuto di carbonio organico nel suolo, profilo di terreno investigato 0-50 cm annata agraria 2011-2012 coltura di trifoglio incarnato*

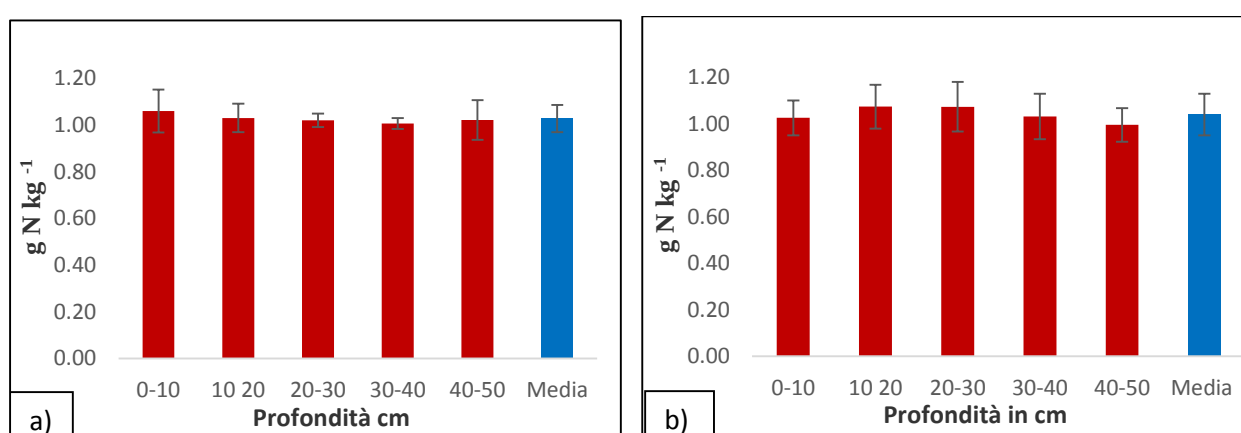
A differenza delle annate agrarie precedentemente descritte, nella stagione produttiva 2012-2013 è stato possibile effettuare i campionamenti di terreno per le successive analisi del carbonio organico in laboratorio ad inizio ciclo, prima delle lavorazioni principali e della semina degli erbai (11/09/2012), ed a fine ciclo dopo la raccolta del fieno (6/06/2013). La Fig.68 mostra le medie del contenuto di carbonio organico rilevato nei due appezzamenti di Roccarespampani nel profilo di suolo 0-50 cm.



**Figura 68.** *Contenuto di carbonio organico nel suolo annata agraria 2012-2013, profilo di terreno investigato 0-50 cm*

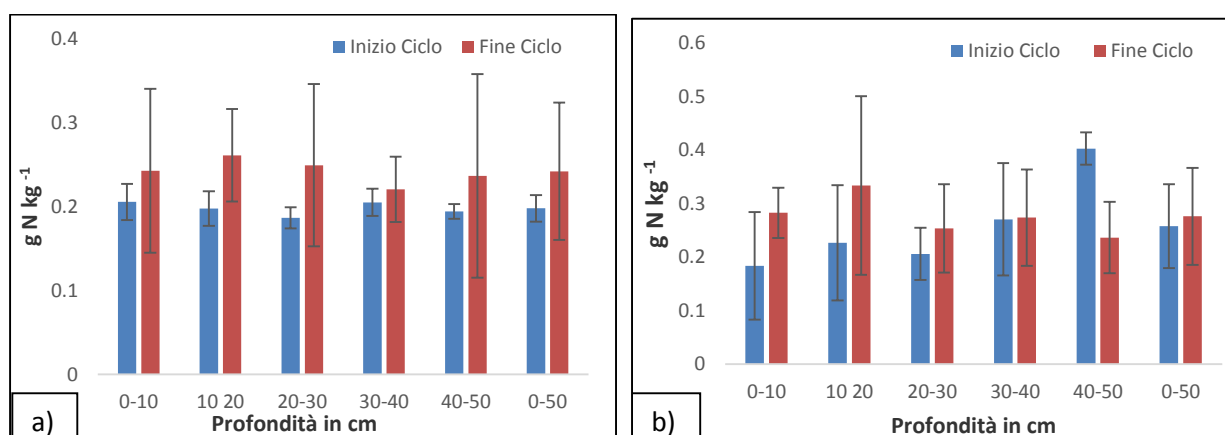
#### 4.4.4. Analisi dell'azoto totale e nitrico del suolo

I risultati dell'analisi dell'azoto totale ottenuti con il metodo Kjeldhal sono riportati nelle figure 69a e 69b. Per quanto riguarda i campionamenti effettuati nella stagione produttiva 2012-13 nel sito di ricerca IT-Ro3 sulla coltura di erbaio trifoglio incarnato-loiessa e nel sito IT-Ro4 erbaio avena-vecchia (paragrafo 4.1.4). Il valore medio registrato nei due campi per il profilo di suolo investigato (0-50 cm) è stato pari a  $1,04 \pm 0,09$  g N kg<sup>-1</sup> per il primo erbaio e  $1,03 \pm 0,06$  g N kg<sup>-1</sup> per il secondo erbaio, vale a dire rispettivamente ad un contenuto medio nei terreni di azoto totale pari a  $5558,8 \pm 146,9$  kg N ha<sup>-1</sup> e  $5372,2 \pm 36,4$  kg N ha<sup>-1</sup>.



**Figura 69.** a) Contenuto di N totale nel campo di ricerca IT-Ro3 erbaio stagione 2012-2013, b) Contenuto di N totale nel campo di ricerca IT-Ro4 erbaio stagione 2012-2013.

L'andamento delle analisi dei nitrati, effettuata solo nell'annata agraria 2012-2013 negli erbai dei campi sperimentali IT-Ro3 e IT-Ro4 sono riportati nella Fig. 70a e Fig. 70b.

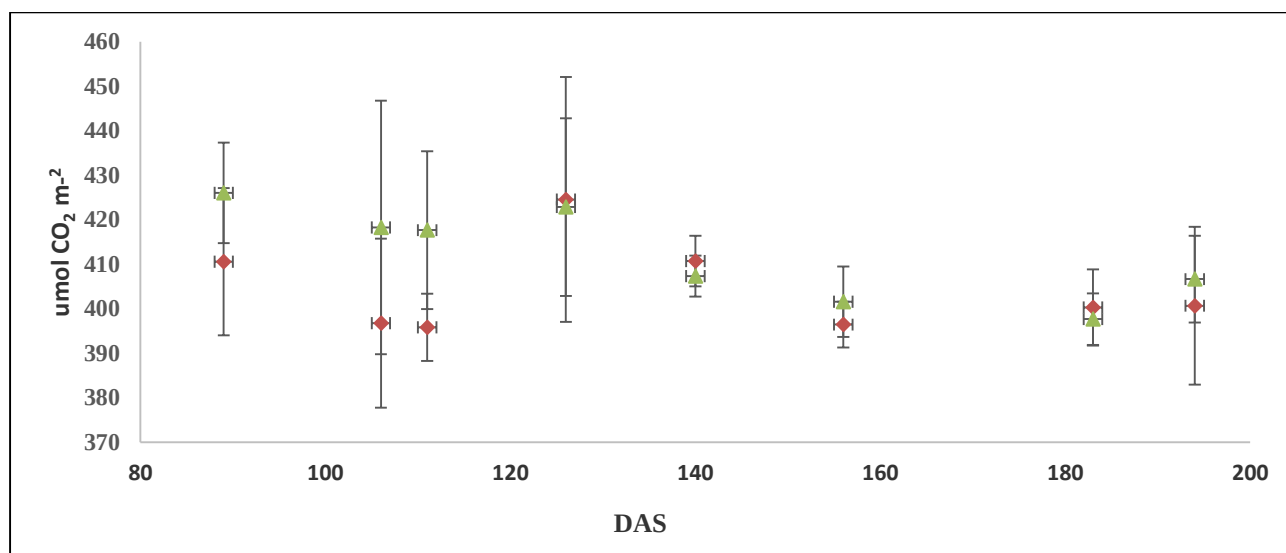


**Figura 70.** Risultati delle analisi dei nitrati effettuate nel suolo nello strato 0-50 annata agraria 2012-2013 a) Erbaio IT-Ro3 b) Erbaio IT-Ro4.

Sono stati prelevati dal terreno nel profilo di suolo da 0 a 50 cm (ad intervalli di 10 cm per un totale di 5 campioni per ogni profilo) per un totale di 40 campioni di suolo, 20 ad inizio ciclo colturale (11/09/2012) prima delle lavorazioni del terreno per la semina dell'erbaio e 20 a fine ciclo colturale, il giorno 6/06/2013 dopo la raccolta del fieno avvenuta il 20/05/2013. Il contenuto nei due erbai di azoto nitrico è apparso più alto nelle analisi effettuate a fine ciclo. La Fig. 71a mostra come tra i diversi profili di suolo investigato ci siano delle differenze tra i dati misurati ad inizio ciclo e a fine ciclo, compresi tra un range di 150 mg e 350 mg N kg<sup>-1</sup>, con una media lungo il profilo 0-50 cm di 198 ± 16 mg N kg<sup>-1</sup> per il campionamento ad inizio ciclo e a 242 ± 82 mg N kg<sup>-1</sup> per il rilievo a fine ciclo. Il profilo con la più alta concentrazione di nitrato rilevato durante il primo campionamento è stato 0-10 cm con un valore pari a 205 ± 21 mg N kg<sup>-1</sup> mentre a fine ciclo il profilo con la più alta concentrazione è stato 10-20 cm con un valore pari a 249 ± 96 mg N kg<sup>-1</sup>. La Fig. 71b mostra l'andamento dell'azoto nitrato rilevato nell'erbaio IT-Ro4. Anche in questo caso si notano delle differenze tra i dati misurati ad inizio ciclo e a fine ciclo, con un'alta variabilità nel range di concentrazione di nitrati, che vanno da un minimo di 183 mg N kg<sup>-1</sup> ad un massimo di 403 mg N kg<sup>-1</sup>. La media registrata lungo il profilo 0-50 cm ad inizio ciclo è stata pari a 258 ± 78 mg N kg<sup>-1</sup> con il profilo 40-50 cm ad avere la più alta concentrazione di N nitrico registrato pari a 402 ± 30 mg N kg<sup>-1</sup>. A fine ciclo si sono registrati valori leggermente più alti rispetto ad inizio ciclo lungo il profilo 0-50 pari a 276 ± 90 mg N kg<sup>-1</sup>, ma distribuiti in maniera più variabile lungo i profili a differenze del campionamento a inizio ciclo. In questo caso il profilo 10-20 cm è stato quello che ha fatto registrare la maggiore concentrazione di azoto nitrico pari a 334 ± 166 mg N kg<sup>-1</sup>. Tuttavia va segnalato che le analisi effettuate con il metodo colorimetrico della spettrofotometria sono delicate in quanto si analizzano numeri molto piccoli e soggetti ad errore dovuti alla retta di taratura dello spettrofotometro. Nel nostro caso il contenuto di azoto nitrico nel terreno è stato stimato ad un valore pari a circa 11,5 ± 1,6 kg N ha<sup>-1</sup> per il sito IT-Ro3 e 14,0 ± 0,7 kg N ha<sup>-1</sup> per il sito IT-Ro4, in linea con le analisi del terreno rilevate negli anni precedenti dal dipartimento DAFNE.

#### 4.5. Misure ancillari di flussi di gas ad effetto serra dal suolo

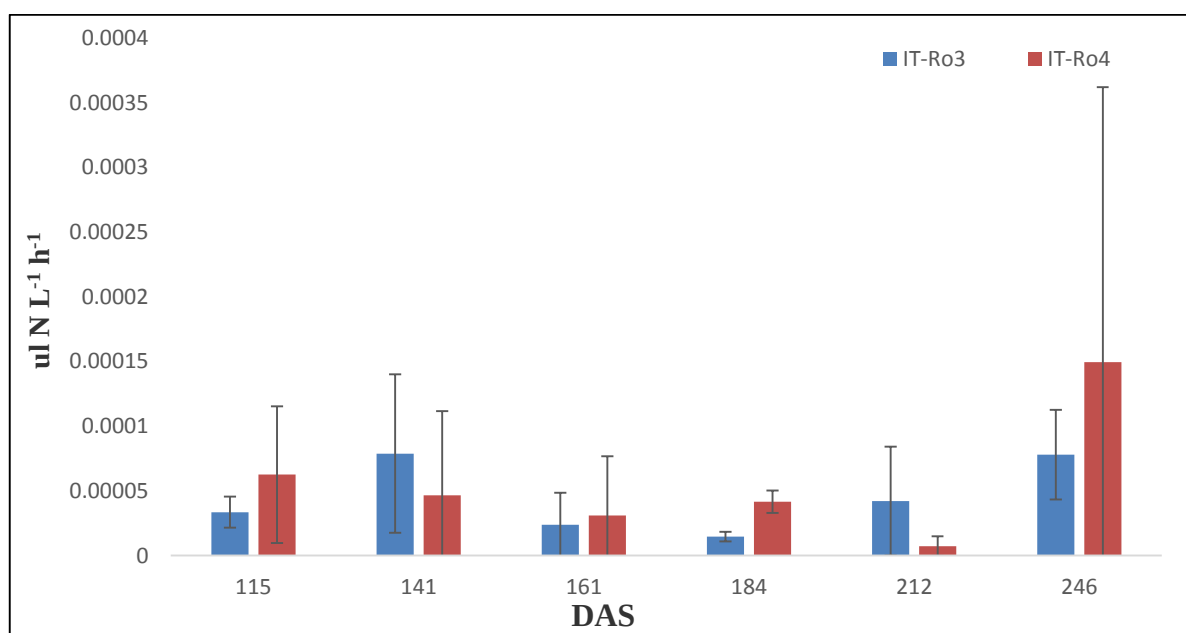
In corrispondenza delle aree di campionamento sui siti di ricerca seguendo lo schema area frame randomised, si è misurato attraverso le camere il flusso di anidride carbonica e il protossido di azoto.



**Figura 71.** Misure ancillari dell'anidride carbonica registrate con lo strumento PP-System.

La Fig. 71 mostra i risultati ottenuti delle misure di CO<sub>2</sub> effettuate nel suolo dei siti sperimentali IT-Ro3, IT-Ro4 con lo strumento PP-System. Si può notare come nei primi tre rilievi, il campo IT-Ro3 abbia una respirazione del suolo leggermente minore rispetto al campo IT-Ro4. In seguito i rilievi effettuati mostrano che i due campi hanno un flusso di carbonio simile. Purtroppo l'idea iniziale era stata quella di poter discriminare la respirazione autotrofa da quella eterotrofa nei siti di ricerca con la tecnica della "Root Exclusion" (Hanson et al., 1998), per poi integrare i dati ottenuti con le misure ancillari con i dati registrati con la tecnica EC. Ma per motivi vari, come la difficoltà di installare in loco i cerchi in acciaio per l'applicazione della tecnica non hanno permesso la completa riuscita della misura preposta, dandoci solo un'indicazione giornaliera e saltuaria della respirazione del suolo ottenuta con lo strumento PP-System. La Fig. 72 mostra i risultati ottenuti dalla gas-cromatografia nell'analisi del protossido d'azoto campionata nei siti sperimentali nella stagione produttiva 2012-2013. Da un primo esame si nota come i flussi del suolo siano molto bassi, di poco superiori al limite della concentrazione media atmosferica di protossido d'azoto (322 ppb). Il flusso medio registrato nel sito sperimentale IT-Ro3 è stato pari a  $4,52 \cdot 10^{-5} \pm 2,98 \cdot 10^{-5} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  con il valore minimo rilevato a 184 DAS (giorni dalla semina) nel 4° rilievo pari a  $1,47 \cdot 10^{-5} \pm 0,038 \cdot 10^{-5} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , mentre il valore massimo si è osservato nel 2° rilievo con un flusso pari a  $7,88 \cdot 10^{-5} \pm 6,12 \cdot 10^{-5} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  a 246 DAS.

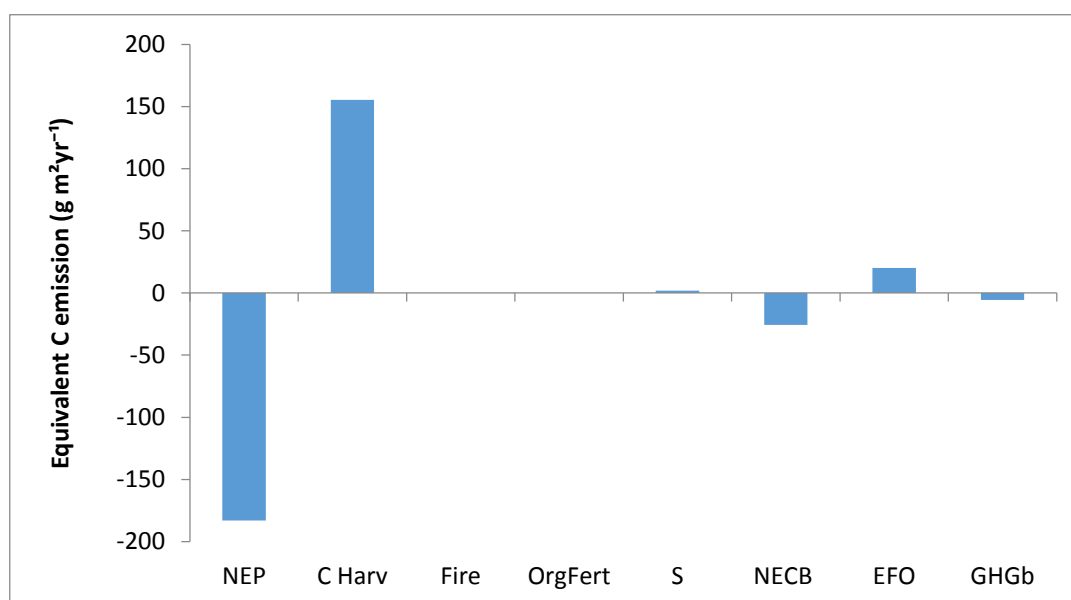
Nel sito IT-Ro4 il valore medio registrato è stato di flusso è stato pari a  $5,64 \cdot 10^{-5} \pm 6,54 \cdot 10^{-5} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , valori leggermente superiori al campo IT-Ro3 ma sempre bassi in termini di flusso di protossido d'azoto nell'agroecosistema. Il valore minimo positivo è stato osservato a 212 DAS pari  $7,32 \cdot 10^{-6} \pm 7,48 \cdot 10^{-6} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , mentre il valore massimo è stato rilevato nell'ultimo campionamento a 246 DAS pari a  $1,49 \cdot 10^{-4} \pm 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ uL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  con range variabile del picco di misurazione rispetto agli altri rilievi. Valori dei flussi così bassi, al limite della concentrazione atmosferica sono dovuti a diversi fattori: caratteristiche fisico chimiche del suolo; andamento climatico stagionale; applicazione o meno della fertilizzazione. In particolare i due campi sperimentali erano coltivati ad erbai, senza concimazione azotata e questo potrebbe avere determinato un basso livello di emissione di protossido di azoto da parte del suolo (Chapuis-Lardy et al 2006). Un altro fattore che influenza l'incertezza della misura riguarda la capacità del gascromatografo durante il processo di combustione, la soglia minima del sensore FID detection del gascromatografo potrebbe tralasciare alcuni dati essendo troppo bassi per la sensibilità del gascromatografo, dando dei risultati incerti in quei campioni dove il flusso di per se è basso o addirittura negativo (Verchot et al 1999). Un altro fattore che d'incertezza nelle misurazioni in campo con la metodologia delle camere mobili è proprio la sensibilità della tecnica di acquisizione dei rilievi in campo con tale metodologia come evidenziato da Hutchinson e Livingstone (1993) che potrebbero sottostimare le misure (media del 10-20 %). Tuttavia anche altri ricercatori hanno analizzato il flusso di protossido d'azoto nelle vicinanze del nostro sito sperimentale ottenendo dei risultati simili, in certi casi con assenza di flusso (Sabbatini et al 2014).



**Figura 72.** Flusso del protossido d'azoto nei siti di ricerca determinato con analisi delle camere mobili e successiva gascromatografia.

#### 4.6. Bilancio del carbonio e dei gas serra nell'agro-ecosistema a livello di sito

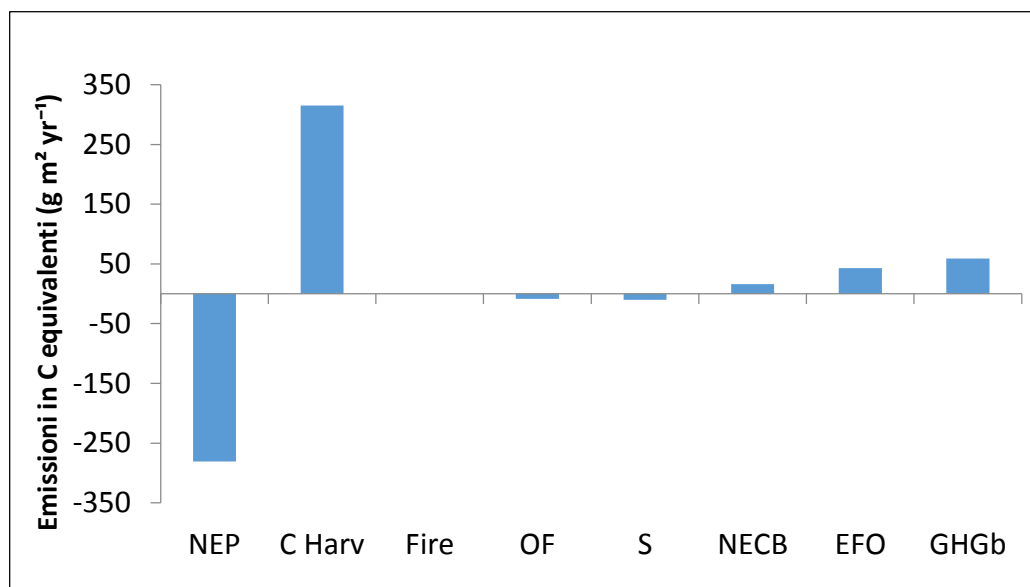
Il bilancio del carbonio a livello di sito per ogni stagione produttiva è stato calcolato integrando su tutta la stagione colturale i dati di Net Ecosystem Exchange (NEE) ottenuti con la tecnica EC e considerando ulteriori apporti ed asportazioni di C legati alla gestione agronomica, utilizzando la metodologia proposta da Ceschia et al. (2010). Sono state inoltre considerate le emissioni indirette di gas serra causate dalle pratiche agricole durante l'itinerario tecnico di gestione delle colture (EFO) stimando anche il bilancio del carbonio considerando tali emissioni (GHGb). Il periodo di riferimento del calcolo Net Ecosystem Production (NEP) valore cumulativo di NEE in un lasso di tempo prescelto, per ogni annata agraria è stato stabilito come l'intervallo che va dalla lavorazione principale post semina, fino alla raccolta del prodotto (granella, biomassa).



**Figura 73.** Bilancio del carbonio e dei gas serra nell'appezzamento IT-Ro3 per la stagione colturale 2009-2010.

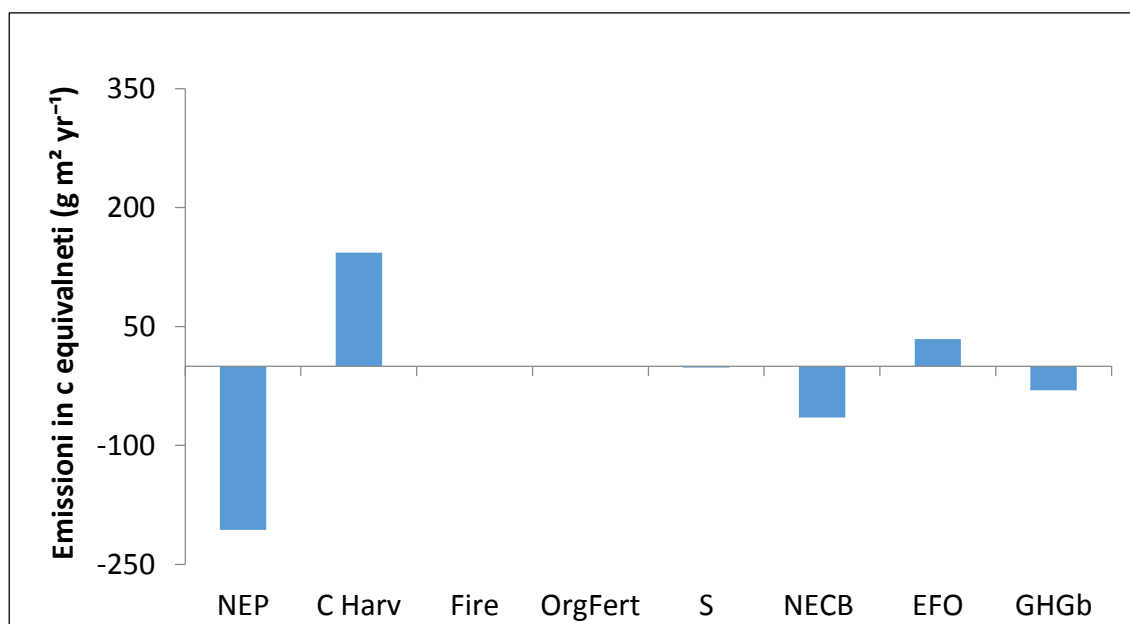
La Fig. 73 riporta il bilancio del carbonio e dei gas serra calcolato durante la stagione colturale 2009-2010, nel campo IT-Ro3 con la coltura di trifoglio incarnato. La Net Ecosystem Production (NEP), ottenuta sommando i valori giornalieri di NEE per il periodo 1/10/2009 - 1/07/2010, è stata pari a -182,95 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; il carbonio asportato tramite la raccolta del seme e del fieno è stata pari a 155 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; non ci sono stati apporti di carbonio organico né perdite dovute a incendi. L'apporto della semente è stato pari a -1,8 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; la NECB è stata quindi pari a -5,65 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, equivalente ad un debole sink di C. Le emissioni dovute alle lavorazioni del terreno e delle pratiche colturali adottate durante il ciclo colturale (Emissions from Field Operations, EFO), calcolate tramite i coefficienti proposti da Lal (2004), hanno totalizzato 20,05 g C equivalenti m<sup>-2</sup>.

Prendendo in considerazione anche le EFO, si ottiene dunque un bilancio dei gas serra pari a pari a -5.6 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$  (GHGb). L'agro-ecosistema, includendo i flussi GHG dovuti alle lavorazioni ed al management, risulta dunque essere un sink di carbonio gas serra. La procedura di calcolo delle variabili del bilancio del carbonio e dei GHG con questa metodologia è stata applicata a tutte le stagioni colturali in cui i dati erano disponibili, di seguito ne riportiamo i risultati.



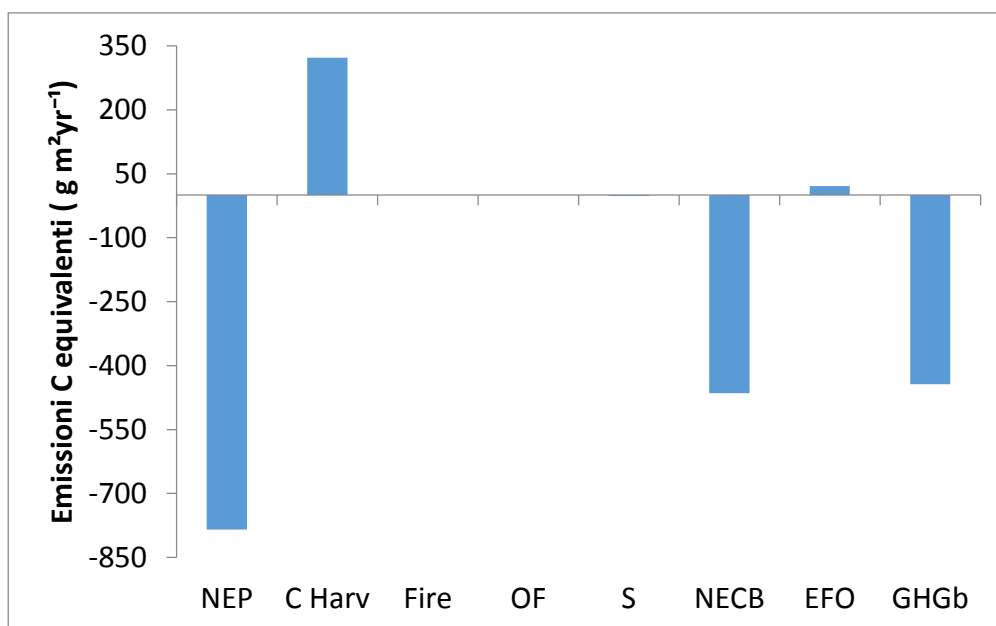
**Figura 74.** Bilancio del carbonio e dei gas serra nell'appezzamento IT-Ro3 per la stagione colturale 2010-2011

La Fig. 74, mostra il bilancio del carbonio calcolato durante l'annata agraria 2010-2011 nel campo IT-Ro3 con la coltura di frumento duro. La NEP, cioè la NEE cumulata per il periodo 1/08/2010 - 29/06/2011, è stata pari a -280,73 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$ ; il carbonio asportato tramite la raccolta della granella e della paglia è stata pari a 315,45 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$ ; gli apporti di carbonio dovuto alle fertilizzazioni organiche sono stati pari a -8,37 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$  e quello apportato dalla semente è stato pari a -10,3 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$ . In totale, la NECB è stata pari a 16,05 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$ , risultando dunque la coltura pressoché neutra in termini di emissioni di C. Le emissioni dovute alle lavorazioni del terreno e delle pratiche colturali adottate durante il ciclo colturale (EFO) sono state pari 43,1 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$ . Dunque calcolando il bilancio dei gas serra comprendendo le EFO, i flussi totali del sito sono stati pari a 59,15 g C equivalenti  $\text{m}^{-2}$  (GHGb). Quindi l'agro-ecosistema risulta essere una fonte di gas serra.



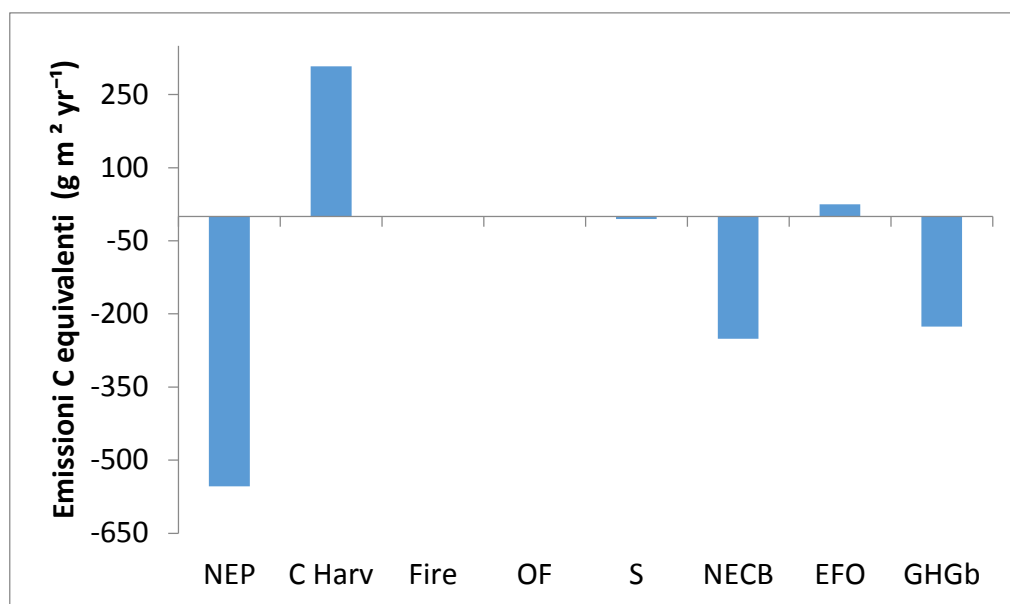
**Figura 75.** Bilancio del carbonio e dei gas serra nell’appezzamento IT-Ro4 per la stagione culturale 2011-2012, coltura di trifoglio incarnato.

La Fig. 75, riporta il bilancio del carbonio calcolato durante l’annata agraria 2011-2012 nel campo IT-Ro4 con la coltura di trifoglio incarnato. La NEP calcolata dalla NEE per il periodo 1/10/2011 - 1/07/2012 è stata pari a -206,39 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, mentre il carbonio asportato tramite la raccolta della semente e del fieno è stato pari a 143,3 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. Non ci sono state fertilizzazioni e neanche incendi che hanno inciso sul bilancio del carbonio. L’apporto da parte della semente è stato di -1,6 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. La NECB è stata pari a -64,69 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, indicando che il sistema si comporta come un sink di C. Le emissioni durante il ciclo colturale sono state pari a 34,18 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. Il bilancio finale dei gas serra (GHGb) è stato pari a -30,51 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, l’agro-ecosistema durante il ciclo colturale è stato dunque un sink.



**Figura 76.** Bilancio del carbonio e dei gas serra nell’appezzamento IT-Ro3 per la stagione culturale 2012-2013, erbaio di trifoglio incarnato e loietto.

La Fig. 76 illustra il bilancio del carbonio calcolato durante l’annata agraria 2012-2013 nel campo IT-Ro3 con la coltura erbaio con le specie trifoglio incarnato e loietto. La NEP, calcolata dalla NEE nel periodo 1/10/2012 - 22/05/2013, è stata pari a -784,81 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; il carbonio asportato tramite la raccolta del fieno è stato pari a 322,1 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. Non ci sono state né fertilizzazioni né incendi che hanno inciso sul bilancio del carbonio. L’apporto da parte della semente è stato di -2,1 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. La NECB è stata pari a -464,78 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, quindi il sistema si è comportato da sink di C riuscendo ad immagazzinare più carbonio di quanto ne sia stato asportato tramite la raccolta del fieno. Le emissioni dovute alle lavorazioni durante ciclo colturale sono state pari a 20,86 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. Per un calcolo totale di flussi GHGb pari a -443,92 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, anche in questo caso, nonostante le emissioni dovute alle lavorazioni l’agro-ecosistema durante il ciclo colturale è stato un sink.



**Figura 77.** Bilancio del carbonio e dei gas serra nell'appezzamento IT-Ro4 per la stagione culturale 2012-2013, erbaio di avena e veccia

La Fig. 77 riporta il bilancio del carbonio calcolato durante l'annata agraria 2012-2013 nel campo IT-Ro4 con l'erbaio di avena e veccia. La NEP, NEE cumulata sul periodo 1/10/2012 - 20/05/2013, è stata pari a -553,52 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; il carbonio asportato tramite la raccolta del fieno è stato pari a 308,2 g C equivalenti m<sup>-2</sup>; l'input da parte della semente è stato pari a -5,52 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. La NECB è stata dunque pari a -250,92 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, per cui il sistema è riuscito a immagazzinare carbonio più di quanto ne è stato asportato tramite la raccolta del fieno. Le emissioni dovute alle lavorazioni durante ciclo culturale sono state pari a 24,73 g C equivalenti m<sup>-2</sup> (EFO). Considerando il bilancio totale di flussi GHGb pari a -226.2 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, l'agro-ecosistema durante il ciclo culturale è stato un sink. La Tab. 9, mostra la sintesi dei risultati ottenuti per quanto riguarda i bilanci del C e dei GHG nei siti di ricerca nel corso degli anni.

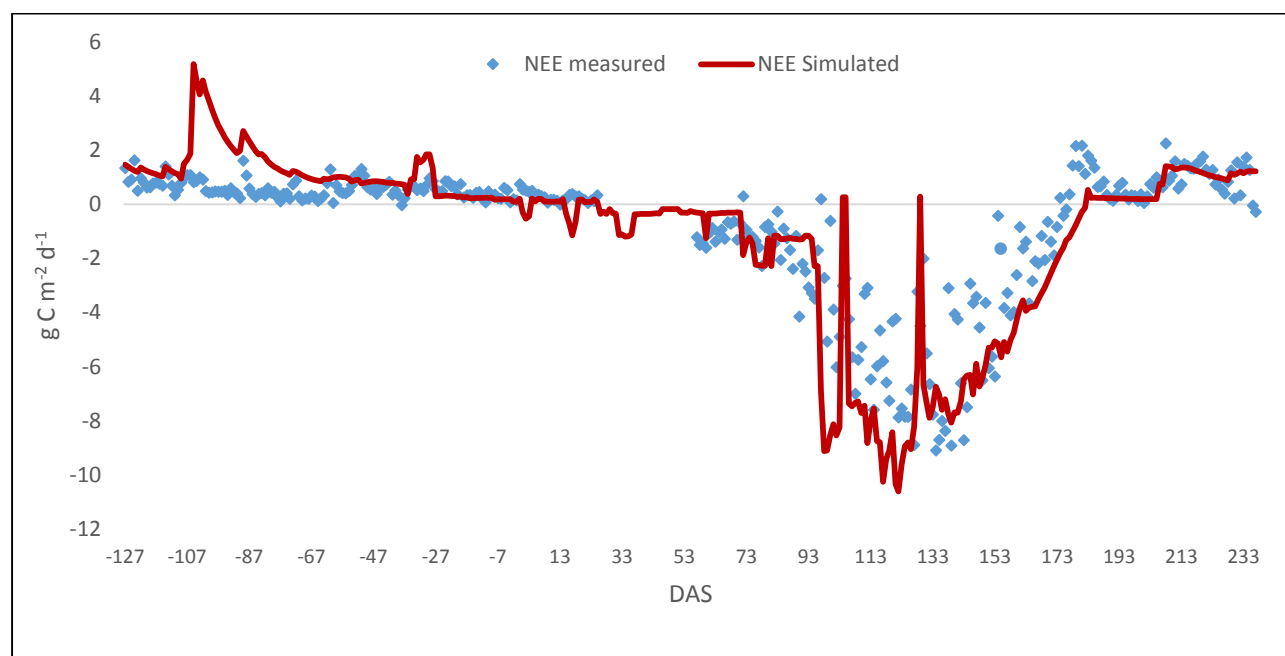
**Tabella. 9.** Sintesi dei bilanci del carbonio per il sito di Roccarespanpani per ogni stagione produttiva calcolate sia in presenza (GHGb) che in assenza delle EFO (NECB).

| Anno    | Sito   | Coltura                    | NEP     | NECB    | GHGb    |
|---------|--------|----------------------------|---------|---------|---------|
| 2009-10 | IT-RO3 | Trifoglio Incarnato        | -182.95 | -25.65  | -5.6    |
| 2010-11 | IT-RO3 | Frumento duro              | -280.73 | 16.05   | 59.15   |
| 2011-12 | IT-RO4 | Trifoglio Incarnato        | -206.39 | -64.69  | -30.51  |
| 2012-13 | IT-RO3 | Erbaio (Trifoglio-Loietto) | -784.81 | -464.78 | -443.92 |
| 2012-13 | IT-RO4 | Erbaio (Avena-Veccia)      | -553.52 | -250.92 | -226.19 |

Considerando nell'insieme i bilanci del carbonio (NECB) calcolati a livello di sito si nota come tutti gli erbai sono dei sink, con un range che varia da -25,65 g C equivalenti m<sup>-2</sup> per il trifoglio incarnato nella stagione 2009-10 ai -464,78 g C equivalenti m<sup>-2</sup> registrati durante la stagione 2012-13 nell'erbaio di trifoglio-loietto. Queste colture riescono a immagazzinare nell'agroecosistema più carbonio di quanto ne perdono, mentre il frumento duro si è rivelato una fonte di carbonio (source) ma con valori molto bassi pari a 16,05 g C equivalenti m<sup>-2</sup>. Se vengono considerate nel bilancio del carbonio (GHGb) anche le emissioni EFO dovute alle lavorazioni del terreno e dalle pratiche colturali, la capacità degli erbai di essere dei sink, diminuisce in base al quantitativo di EFO che varia circa di 20-35 g C equivalenti m<sup>-2</sup>, che va a sommarsi al bilancio, mentre il frumento aumenta la sua caratteristica di essere un source, aumentando il quantitativo di circa 43.15 g C equivalenti m<sup>-2</sup> rispetto alla stima precedente (59.15 g C equivalenti m<sup>-2</sup>)

#### 4.7. Simulazioni di NEE a livello di sito mediante il modello DNDC

È stato possibile testare l'accuratezza delle simulazioni del modello DNDC per quanto riguarda la stima dei flussi di NEE a livello di sito sulle colture di frumento duro (*Triticum durum* Desf.) annata agraria 2010-11 e trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.) 2011-2012.



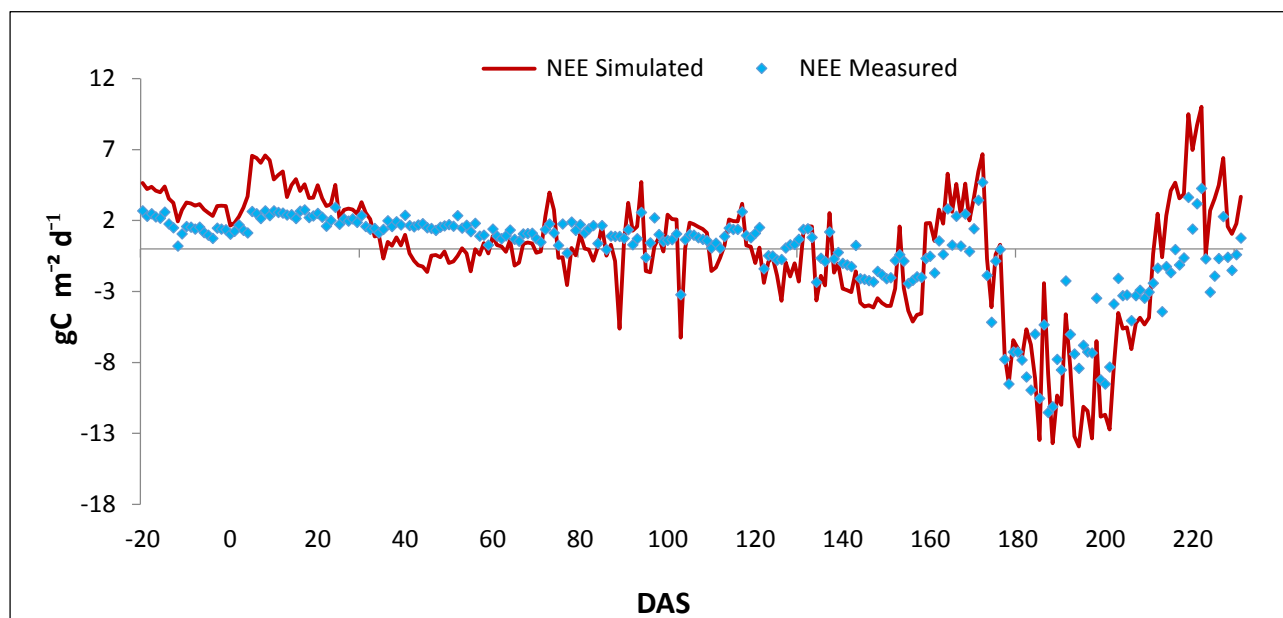
**Figura 78.** Confronto tra i dati di output giornalieri simulati dal modello DNDC di NEE e i dati registrati dalla stazione eddy nel sito di Roccarespampani nella stagione culturale 2010-2011 presso il sito IT-Ro3, coltura frumento duro.

La Fig. 78 mostra l'andamento della NEE stagionale registrata dalla stazione EC nel periodo 1/08/2010- 1/07/2011, durante il ciclo produttivo del frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e l'andamento della simulazione di NEE effettuata dal modello DNDC. I dati cumulati di NEE, cioè i valori di NEP, sono stati pari a  $-280,7 \text{ g C m}^{-2}$ , mentre il dato di output del modello è stato pari a  $-360,4 \text{ g C m}^{-2}$ . Le tendenze di valori NEE misurati e simulati sono molto simili durante tutta la stagione colturale, in particolare durante la fase della maturazione lattea della granella (circa 105 giorni dopo la semina) fino alla fase di maturazione (circa 165 giorni dopo la semina). Tuttavia, il modello tende a sovrastimare la NEE (in valore assoluto), soprattutto durante le lavorazioni del terreno (aratura -107 DAS picchi di source di C) e la fase della levata e di accrescimento del secondo nodo sul culmo (circa tra 90 e 125 giorni dopo la semina (DAS)). Si nota dal grafico che vi è un periodo tra i 25 e 45 giorni dopo la semina in cui la stazione EC non ha registrato dati, in quanto si trovava in manutenzione.

I risultati ottenenti sia dalla simulazione che dai dati osservati, rientrano nel range di NEE rilevati in altri siti di studio europei, dove è stato coltivato frumento duro. I dati di NEP registrati con la tecnica EC per la coltura di frumento duro nel sito di Avignone in Francia nella stagione produttiva 2003-2004 è stato pari a  $-255 \text{ g C m}^{-2}$  e nella stagione 2005-2006 pari a  $-461 \text{ g C m}^{-2}$  come riportato da Ceschia et al. (2010). In bibliografia ci sono pochi studi riguardo il frumento duro, comunque anche i dati osservati per il frumento tenero indicano un NEP negativo: ad esempio nel sito di Grignon nella stagione produttiva 2005-2006 (Francia) NEP è stato pari a  $-179 \text{ g C m}^{-2}$ , mentre ad Auradè (Francia) è stato pari a  $305 \text{ g C m}^{-2}$ . Ovviamente le pratiche di gestione, come il tipo di lavorazione del terreno e la concimazione organica o minerale, variavano tra i diversi siti, influenzando notevolmente l'andamento del NEE, così come l'andamento climatico che varia da un'annata produttiva all'altra e dalla zona geografica del sito (Osborne et al., 2010). Tuttavia la simulazione effettuata dal modello DNDC e i dati osservati dalla stazione EC, forniscono un dato abbastanza attendibile se confrontato con gli altri studi effettuati in Europa. L'analisi statistica ottenuta con il programma MODEVAL 2.0 indica che vi è una associazione significativa tra i dati misurati e simulati, pari a un valore di coefficiente di correlazione  $r = 0.57$  in linea con i risultati ottenuti da Wattenbach et al (2010) il quale ha confrontato l'accuratezza dei modelli CERES-EGC; ORCHIDEE-STIC e DNDC nello stimare lo scambio netto di carbonio nell'ecosistema (NEE) su alcune colture agrarie, tra cui il frumento. DNDC mostra le migliori performance di accuratezza sulle simulazioni cumulative di NEE, nonostante in alcuni casi le simulazioni giornaliere presentano bassi livelli di precisione, soprattutto quando i flussi sono inferiori a  $2 \text{ g C m}^{-2}$  in determinate condizioni climatiche (periodi di siccità). Inoltre l'indice LOFIT (Lack of fit pari a 993) indica che non c'è un errore significativo tra i dati di NEE misurati e

i dati di NEE simulati scartando l'ipotesi nulla confrontando F tabellare critico al 5% (valore 1.44) inferiore al F calcolato (valore 0.03).

La Fig. 79, mostra l'andamento della NEE stagionale registrata dalla stazione EC nel periodo 1 ottobre 2011 - 1 luglio 2012 durante il ciclo produttivo del trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.) e l'andamento della simulazione di NEE effettuata dal modello DNDC.



**Figura 79.** Confronto tra i dati di output giornalieri simulati dal modello DNDC di NEE e i dati registrati dalla stazione eddy nel sito di Roccarespampani nella stagione culturale 2011-2012 presso il sito IT-Ro4, coltura trifoglio incarnato.

I dati di NEP misurati sono stati pari a  $-206.1 \text{ g C m}^{-2}$ , mentre il dato di output del modello è stato pari a  $-116,6 \text{ g C m}^{-2}$ . Si nota dalla Fig.80 che in questo caso, rispetto alla simulazione del ciclo produttivo del frumento (Fig.79), gli andamenti giornalieri dati simulati e misurati sembrano avere una minore corrispondenza. Soprattutto nel periodo dopo la semina, tra 0 e 20 giorni, il modello sovrastima le perdite di carbonio dovute alla lavorazione del terreno per la preparazione del letto di semina con picchi che arrivano fino a  $6 \text{ g C m}^{-2}$  rispetto ai  $2 \text{ g C m}^{-2}$  misurati in sito (5 DAS). Inoltre dopo la fase di emergenza della plantula e l'inizio della fase di accrescimento della rosetta per il riposo vegetativo invernale, si nota un'eccessiva assimilazione di carbonio simulata durante una fase in cui la pianta ancora non è totalmente sviluppata (tra i 25 e i 60 DAS). L'analisi statistica effettuata con MODEVAL 2.0, indica che vi è una associazione significativa tra i dati misurati e simulati di NEE pari a un valore di coefficiente di correlazione  $r = 0.35$ . Indice LOFIT (Lack of fit) indica che non c'è un errore significativo tra i dati di NEE misurati e i dati di NEE simulati scartando l'ipotesi nulla confrontando F tabellare (critico al 5% 1.44) inferiore al F calcolato (0.08). Tuttavia la tendenza generale di stima di NEE è abbastanza accurata se presa in considerazione la stagione culturale per

intero dalla semina alla raccolta, nonostante si siano osservati periodi di eccessivo assorbimento negativo e positivo. Questo andamento altalenante è dovuto a diversi fattori tra cui, il fatto che il modello DNDC è sensibile alla simulazione di NEE negli agroecosistemi a bassa intensità di assorbimento e di input (erbai naturali o artificiali che non ricevono fertilizzazioni, come in questo caso) in accordo con quanto riportato nella ricerca da Beheydt et al. (2007). Inoltre la coltura di trifoglio incarnato, dell'agricoltura mediterranea, dove è utilizzata soprattutto come foraggio essiccato, risulta poco studiata e non ci sono lavori che analizzano gli scambi di carbonio nel ciclo colturale di questa coltura. I risultati ottenuti confermano comunque che la coltura è un sink di carbonio, come osservato negli erbai consociati da loglietto (*Lolium perenne* L.) e trifoglio bianco (*Trifolium repens* L.) in Irlanda, studiati da Abdalla et al (2013) che hanno riportato valori negativi di NEP, pari a  $-212 \text{ g C m}^{-2}$ . Tale studio conferma che il modello DNDC è un buon modello per la stima del NEE nonostante anche abbia riscontrato nella dei periodi di sovrastima dei flussi di C.

#### **4.8. Simulazioni di NEE per la Provincia di Viterbo mediante il modello DNDC**

Dopo avere effettuato le simulazioni a livello di sito e valutato la buona accuratezza dei valori di output di NEE del modello rispetto ai dati misurati in campo da parte delle stazioni EC, si è deciso di applicare il modello DNDC per uno studio preliminare sulla distribuzione spaziale dei flussi di NEE a livello provinciale affrontando il caso di studio di due colture erbacee rappresentative del panorama agricolo viterbese il frumento duro (*Triticum durum* Desf.) e il trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum* L.). A tale proposito il primo step è stato raccogliere le informazioni agronomiche a livello provinciale, per le pratiche colturali che vengono effettuate durante il ciclo produttivo delle colture prese in esame nel caso di studio.

##### **4.8.1. Informazioni agronomiche estratte dal database delle pratiche agricole.**

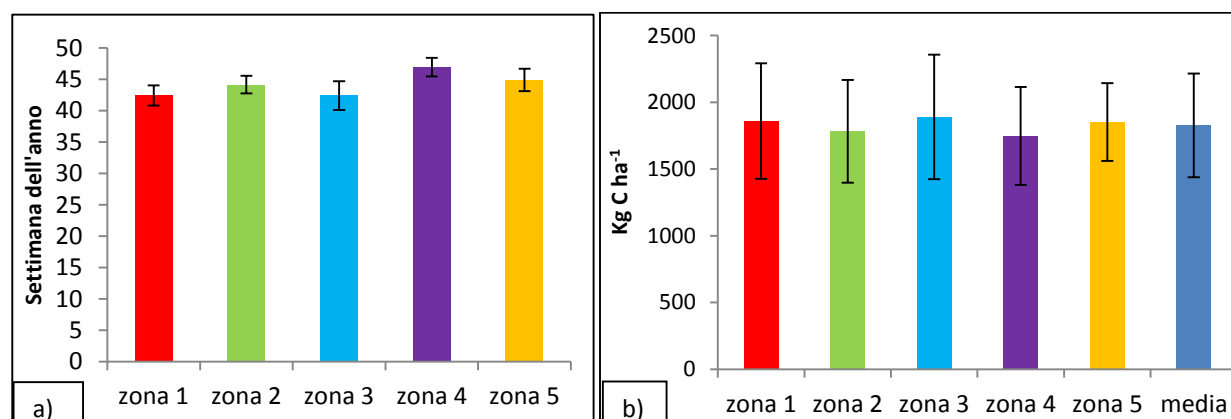
In questo paragrafo è riportata un'analisi dei dati di gestione agronomica delle colture di frumento duro e trifoglio incarnato comunemente seguite dalle aziende della Provincia di Viterbo, estratti dal database agricole assemblato per questo progetto. Tale database è disponibile in formato elettronico sul sito del progetto GHG-Europe, sezione dati spaziali per il centro Italia (<http://www.europe-fluxdata.eu/ghg-europe/data/spatial>). La distribuzione delle aziende con dati riguardanti la gestione agronomica del frumento duro all'interno della Provincia di Viterbo, divise per zone è riassunta nella Tab. 10. Nel database erano incluse 71 aziende agricole con notizie sulla coltivazione del frumento duro, con una superficie agricola utilizzata (SAU) pari a 3515,1 ha. La zona con il maggior numero

di aziende è risultata la zona 2 (zona delle colline interne) con 29 unità, mentre la maggiore SAU è stata registrata nella zona 4 (zona costiera e valle del Tevere) con 2034 ha, nonostante il minor numero di aziende, pari a 18 unità.

**Tabella 10.** Distribuzione all'interno delle zone agro climatiche della Provincia di Viterbo (Fig.26) delle aziende e superficie agricola utilizzata (SAU) per la coltivazione di frumento duro presenti nel database.

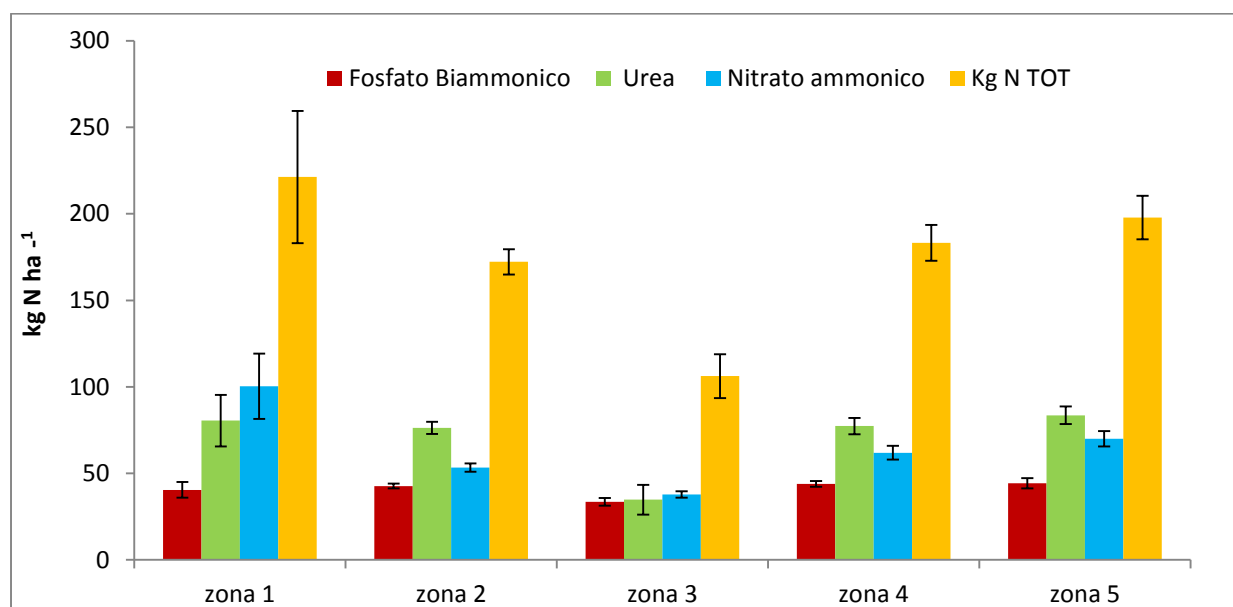
| ZONA       | n°aziende | SAU (ha)      |
|------------|-----------|---------------|
| 1          | 6         | 82.95         |
| 2          | 29        | 513           |
| 3          | 6         | 85.1          |
| 4          | 18        | 2034          |
| 5          | 12        | 800           |
| <b>TOT</b> | <b>71</b> | <b>3515.1</b> |

La Fig. 80a illustra le settimane dell'anno in cui viene effettuata la semina del frumento duro all'interno della Provincia di Viterbo. La settimana di semina varia da zona a zona, con un range compreso tra circa la 42<sup>a</sup> e la 48<sup>a</sup> settimana dell'anno (inizio ottobre - primi di dicembre). La semina risulta anticipata (42<sup>a</sup> settimana) nella zona 1 (Colline Cimini e Vulsini) e zona 3 (Colline del Sud e di Nepi) mentre nella zona 4 (Area Costiera e Valle del Tevere) le semine sono più tardive, avvenendo mediamente alla  $47 \pm 1,5$  settimana dell'anno. Questa variabilità delle date di semina è legata alle condizioni climatiche: nella zona 4, per esempio, sono più frequenti i periodi di siccità estiva con elevate temperature, rispetto alle zone interne, che rendono difficile arare il terreno in condizioni di tempera alla fine dell'estate. La Fig. 81 b ci permette di osservare che la media totale di granella raccolta nell'area del viterbese pari a  $4.150,1 \pm 883,4 \text{ kg ha}^{-1}$  di sostanza secca cioè pari ad un valore in carbonio medio di  $1.826,1 \pm 388,7 \text{ kg C ha}^{-1}$ .



**Figura 80. a)** Valori medi e deviazioni standard della settimana di semina; **b)** Valori medi e deviazione standard della produzione di granella di frumento duro

E' interessante notare (Fig. 81), come la concimazione azotata differisca tra le diverse zone della Provincia. Vi sono differenze sia per il tipo di concime utilizzato (fosfato biammonico, urea, nitrato ammonico), sia per la quantità totale di azoto che viene utilizzata nella coltivazione del frumento duro. Di solito la scelta del tipo di concime da parte degli agricoltori dipende dal prezzo di mercato e dai disciplinari della gestione agronomica di quelle aziende che ricadono zone vulnerabili ai nitrati. La zona 1 (zona dei monti Cimini e Vulsini) risulta essere quella in cui viene utilizzato un quantitativo totale di azoto maggiore, pari a  $221,3 \pm 38 \text{ kg N ha}^{-1}$ , mentre nella zona 3 (zona delle colline del sud e Nepi) le quantità di azoto usate sono più basse, pari a  $106,2 \pm 30,58 \text{ kg N ha}^{-1}$ .



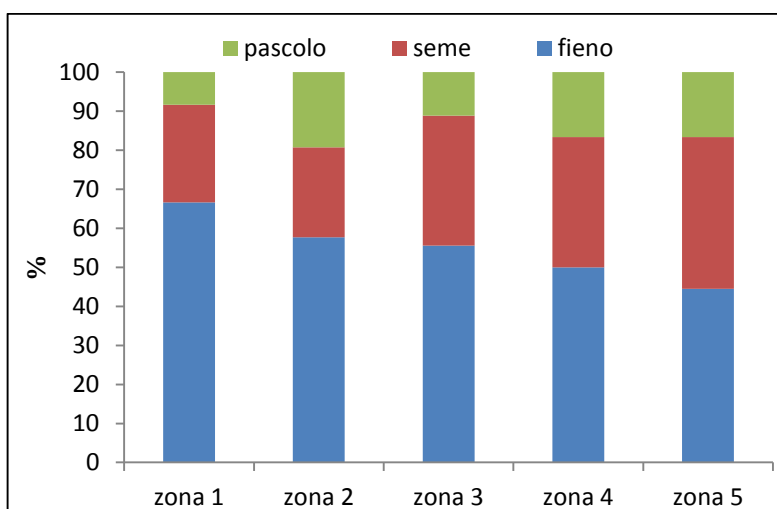
**Figura 81.** Valori medi della quantità e del tipo di concime azotato utilizzato negli itinerari tecnici del frumento duro nella provincia di Viterbo

Per quanto riguarda la coltivazione di trifoglio incarnato nella Provincia di Viterbo la Tab. 11 ci fornisce le indicazioni del numero delle aziende del database con notizie riguardanti la coltivazione tale coltura e della loro distribuzione nelle diverse zone agroclimatiche. Anche in questo caso sono state individuate 71 aziende agricole con una superficie totale coltivata in SAU di circa 1480,5 ha. La zona con il maggiore numero di aziende presenti nel database è risultata la zona 2 (zona delle colline interne) con 26 unità, mentre nella zona 5 (pianure e bassi rilievi interni) si è registrata la maggiore superficie agricola utilizzabile pari a 442,5 ha.

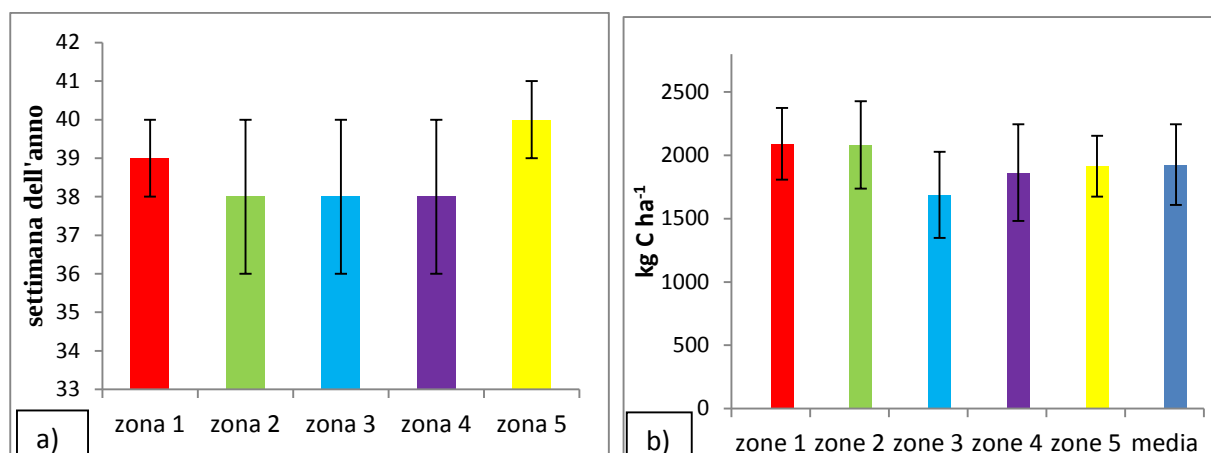
**Tabella 11.** Distribuzione all'interno delle zone agro climatiche della Provincia di Viterbo (Fig.26), delle aziende e superficie agricola utilizzata (SAU) per la coltivazione trifoglio incarnato.

| ZONA       | n° aziende | SAU (ha)      |
|------------|------------|---------------|
| 1          | 12         | 119.4         |
| 2          | 26         | 414.4         |
| 3          | 9          | 154.2         |
| 4          | 6          | 350           |
| 5          | 18         | 442.5         |
| <b>TOT</b> | <b>71</b>  | <b>1480.5</b> |

La coltura di erbaio con la specie vegetale di trifoglio incarnato, ha molteplici usi nell'agricoltura della Provincia: la Fig. 82 illustra la destinazione del prodotto coltivato. L'uso principale osservato in tutte le zone di tutta la Provincia è la produzione di fieno per l'alimentazione del bestiame (50-60%), ma con un andamento decrescente dalla zona 1 alla 5, in quanto una parte considerevole delle aziende utilizzano il raccolto per produzione di sementi vendute a buon prezzo sul mercato locale soprattutto per la coltivazioni di erbai destinati alla pastorizia.



**Figura 82.** Destinazione produttiva del trifoglio incarnato nella Provincia di Viterbo. Valori in percentuale divisi per zona agro-climatica di appartenenza.

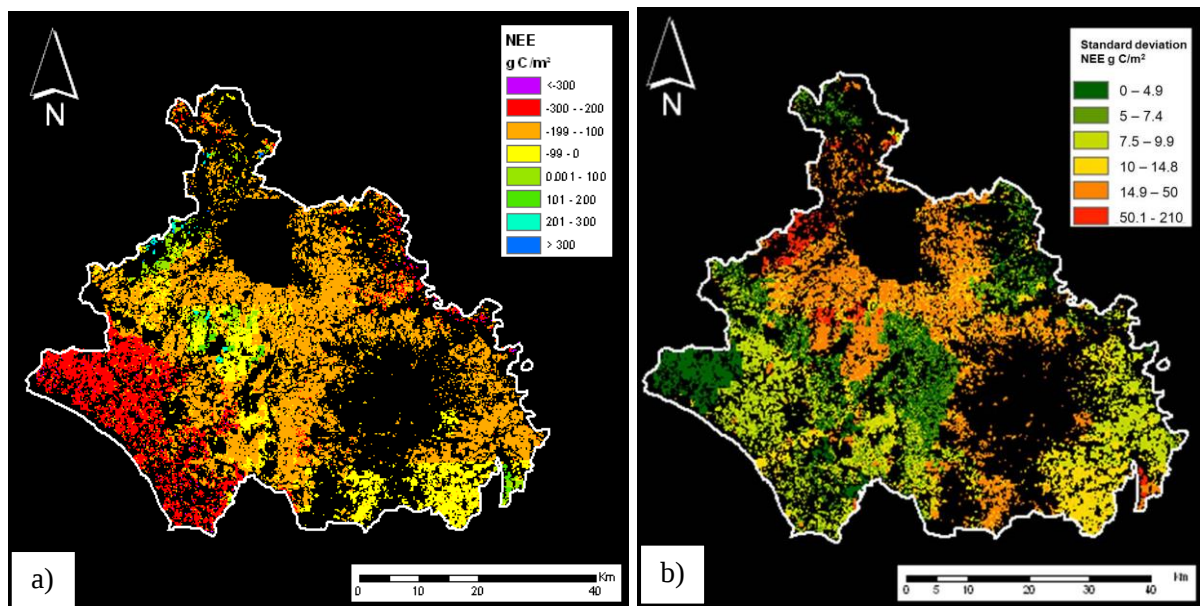


**Figura 83. a)** Valori medi e deviazioni standard della data di semina **b)** Valori medi e deviazione standard produzione di fieno da foraggio del trifoglio incarnato.

Il range di variabilità della settimana di semina della coltura del trifoglio, illustrato nella Fig.83a è strettamente legato alle condizioni climatiche e alle tradizioni agresti che si tramandano nel viterbese come quello di seminare gli erbai autunno-primaverili dopo la festa di Santa Rosa di Viterbo che si festeggia il 4 settembre. Questa credenza è legata anche a conoscenze empiriche degli agricoltori che si riferiscono all'andamento storico delle precipitazioni dopo la stagione estiva, che si verificano di solito nel primo periodo autunnale. Queste precipitazioni permettono alla plantula di trifoglio (o di un'altra specie da erbaio autunno-primaverile) di superare il periodo di emergenza e crescere abbastanza bene per affrontare l'inverno con lo sviluppo della rosetta. Tra le diverse zone agro climatiche il periodo di semina dell'erbaio è abbastanza omogeneo, le semine si concentrano tra la prima decade di Settembre  $38 \pm 1,5$  settimana dell'anno e la prima metà di Ottobre  $40 \pm 1,6$  settimana dell'anno. La resa media di fieno in provincia è di circa  $4.955,2 \pm 817,5$  kg di sostanza secca ha<sup>-1</sup> (Figura 84b) corrispondente a  $1927,6 \pm 318,4$  kg C ha<sup>-1</sup>, con rese più elevate in zona 1 e 2 ( $2090,5 \pm 283,7$  kg C ha<sup>-1</sup>,  $2082,1 \pm 283,7$  kg C ha<sup>-1</sup>) e rendimenti inferiori in zona 3 ( $1687,6 \pm 339,5$  kg C ha<sup>-1</sup>). Il foraggio prodotto è coltivato senza irrigazione e concimazione azotata, il fabbisogno idrico è sopperito dalle precipitazioni atmosferiche in quanto questa coltura resiste bene alla siccità estiva e alle alte temperature. La differenza di produzione tra zona e zona può essere dovuto alle caratteristiche chimico-fisiche del terreno. Le produzioni minori di biomassa per la fienagione registrata nella zona 3 (Nepi e Colline del Sud) potrebbe essere causato da ondate di freddo, che hanno interessato gli erbai nel corso degli anni, durante il periodo primaverile, determinando ritardi di crescita e moria di piante.

#### 4.8.2. Simulazione del NEE del frumento duro

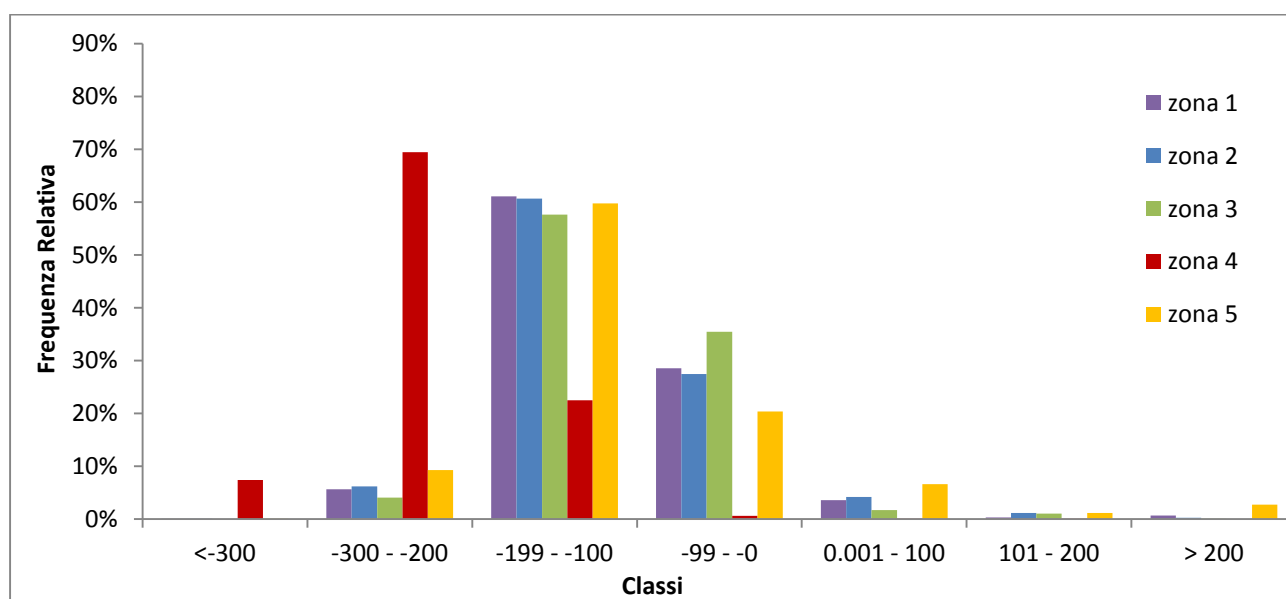
I risultati ottenuti per la stima della Net Ecosystem Exchange (NEE) a livello regionale tramite il modello DNDC 9.5, sono illustrati dalla mappa mostrata in Fig. 84 a. Tali valori sono stati ottenuti dalla somma dei valori giornalieri di NEE simulati per il periodo che va dalla lavorazione principale preparatorie del letto di semina, alla raccolta della coltura (NEP cumulativo della stagione produttiva). In totale sono stati simulati 285,151 pixels con una risoluzione di 50 x 50 m, pari ad un totale di circa 71.287 ha.



**Figura 84.** a) Mappa della simulazione regionale di NEE del frumento duro annata agraria 2008-2009 b) Mappa della stima della deviazione standard del flusso di NEE a livello provinciale.

Le classi di maggiori frequenza di NEE (Net Ecosystem Exchange) simulato, sono risultate negative cioè sink di carbonio, pari al 72,1 % del totale. Le classi rappresentate nella mappa sono distribuite secondo la seguente frequenza: <-300 g C m<sup>-2</sup> pari al 1,4%, classe da -300 a -200 g C m<sup>-2</sup> pari al 17,5% distribuite soprattutto nella zona costiera della provincia (zona 4) e da -199 a -100 g C m<sup>-2</sup> pari al 53,2%, concentrate nelle zone collinare (zona 3 e 5). Si nota che i la maggiore frequenza di valori positivi di NEE si sono verificati nella zona 5, in queste aree è presente una grande quantità di sostanza organica (11% Fig. 23c) e un basso valore di densità apparente (0.96 Fig.23b) in accordo con i dati estratti dal European Soil Database Project Spade 2 (Hannam et al., 2009) che potrebbe avere favorito la respirazione dell'agroecosistema a causa delle condizioni climatiche (precipitazioni e temperature miti). Questo aspetto è stato notato anche nello studio di Ceschia et al (2010) nel sito di Gebesee in Germania, durante la coltivazione di frumento invernale nel 2006-2007 , il valore

cumulativo di NEE durante il ciclo colturale è risultato positivo pari a  $(25,5 \text{ g C m}^{-2})$ , a causa di semina tardiva del cereale e grandi quantità di residui colturali lasciati sul terreno dalla coltura precedente (barbabietola da zucchero) che hanno favorito i fenomeni di respirazione rispetto all'assorbimento di carbonio da parte dell'agroecosistema. La Fig. 84b ci permette di osservare la distribuzione spaziale dell'incertezza calcolata del flusso di NEE tramite l'analisi cluster dei punti rappresentativi delle zone agroclimatiche (paragrafo 3.2.3.2, Fig.26). Come si osserva dalla mappa la maggiore frequenza di incertezza del flusso di NEE che si ottiene dalla coltura di frumento duro ha un valore di deviazione standard compreso tra 10 e 15  $\text{g C m}^{-2}$ .

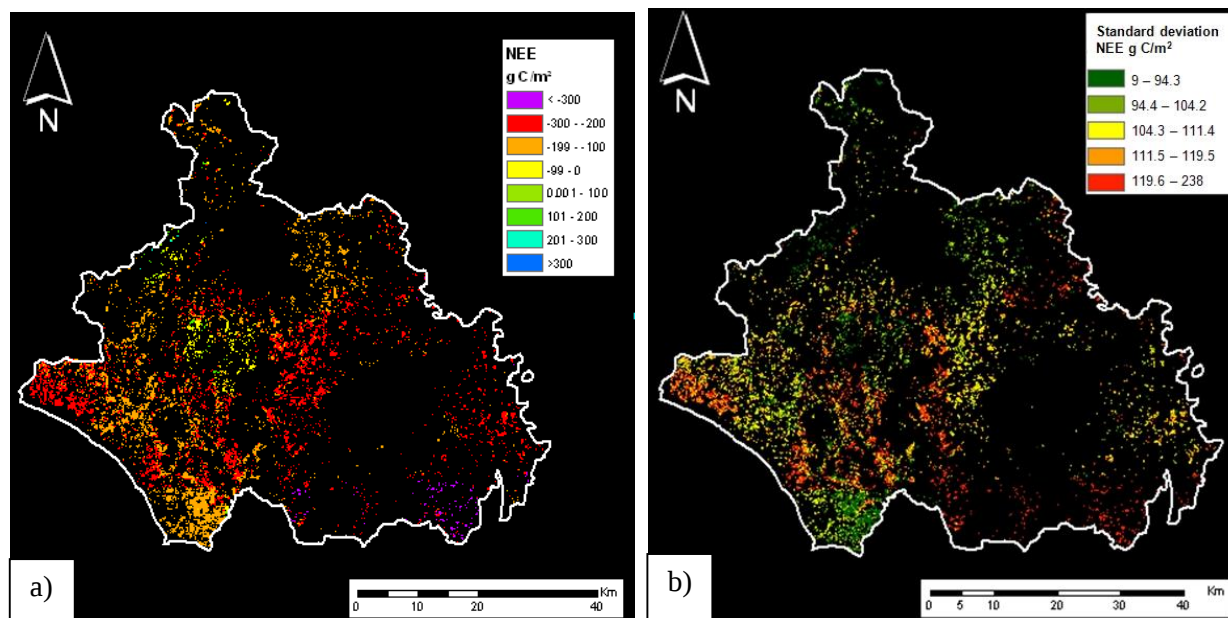


**Figura 85.** Distribuzione delle frequenze stimate di emissioni di NEE del frumento duro, distribuite in base alle zone provinciali di appartenenza della simulazione regionale.

La Fig. 85 mostra in dettaglio la distribuzione di frequenza relativa dei valori NEE nelle cinque zone agroclimatiche in cui è stata suddivisa la Provincia di Viterbo. La classe di NEE da -199 a -100  $\text{g C m}^{-2}$  è la più rappresentata dalla simulazione, pari al 53,2% del totale. Tuttavia, vi sono alcune differenze tra le diverse zone agroclimatiche. La zona 4, per esempio, ha per la maggior parte dei pixels, cioè il 69,5% di celle della griglia di simulazione, valori di NEE simulati che ricadono nella classe compresa tra -300 e -200  $\text{g C m}^{-2}$ . Le altre zone mostrano valori dei flussi distribuiti maggiormente nella classe che va da -199 a -100  $\text{g C m}^{-2}$ , con frequenze relative di circa il 60%. Questo risultato potrebbe essere spiegato dalle condizioni climatiche favorevoli nell'annata 2008-2009, che hanno determinato una buona attività fotosintetica del frumento durante il ciclo colturale, determinando una frequenza di NEE negativa maggiore rispetto alle frequenze positive. Nonostante ciò la spazializzazione del flusso di NEE sulla mappa della Fig. 85a, evidenzia come il

tipo di suolo influenzi il flusso di carbonio del modello come osservato da Hastings et al., (2010). Le aree all'interno della provincia che possiedono un NEE negativo ricadono nella maggior parte dei casi in suolo con tipo di tessitura franca estratto dal European Soil database (paragrafo 3.2.2).

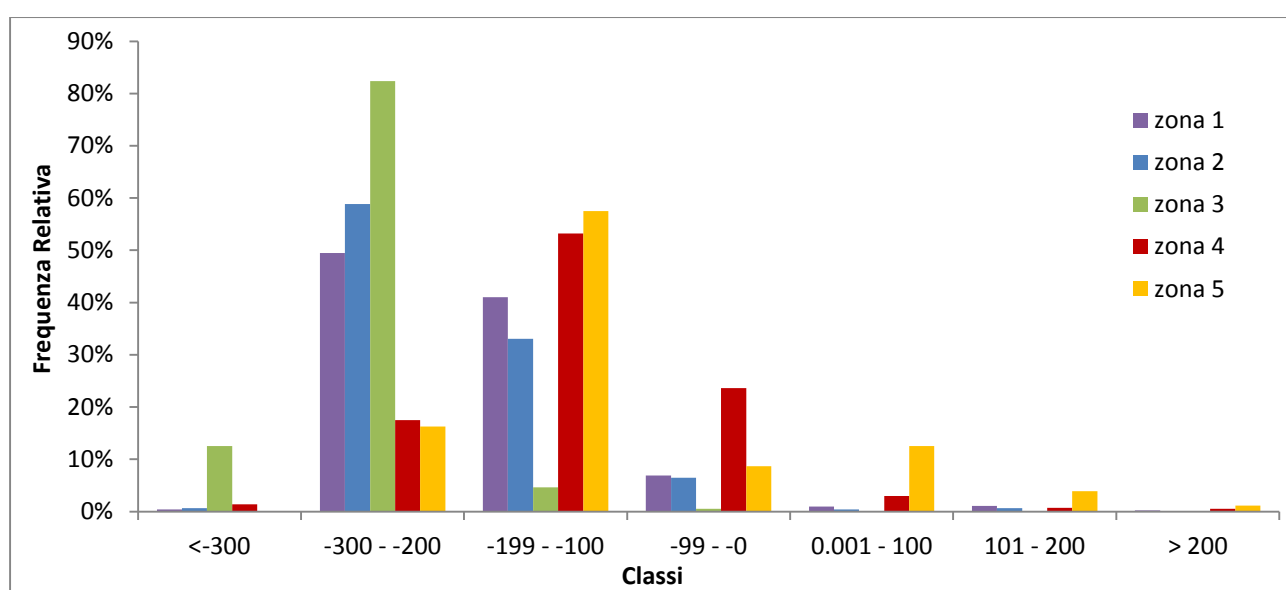
#### 4.8.3. Simulazioni regionali NEE trifoglio incarnato



**Figura 86. a)** Mappa della simulazione regionale di NEE del trifoglio incarnato annata agraria 2008-2009 **b)** Mappa della stima della deviazione standard del flusso di NEE a livello provinciale.

La Fig. 86a mostra i risultati ottenuti dalla simulazione di NEE per il trifoglio incarnato per la Provincia di Viterbo. Anche per questa coltura la maggior parte delle simulazioni ottenute hanno fornito valori di NEE negativi, pari al 94,4 % del totale, evidenziando cioè sink di carbonio. Il numero totale di punti simulati è stato pari a 40,994, pari a circa 10.248 ha. Le principali classi rappresentate nella mappa sono distribuite secondo la seguente frequenza:  $< -300 \text{ g C m}^{-2}$  pari al 1,0%, classe  $-300$  a  $-200 \text{ g C m}^{-2}$  pari al 47,0% (zona 3) e da  $-199$  a  $-100 \text{ g C m}^{-2}$  pari al 46,4% situati nelle zone collinari della Provincia (zona 1 e zona 2). Anche in questo caso i pixels che presentano un NEE positivo ricadono in quelle aree della provincia ricche di sostanza organica (Fig.23c) La Fig. 86b ci permette di osservare la distribuzione spaziale dell'incertezza calcolata del flusso di NEE tramite l'analisi cluster dei punti rappresentativi delle zone agroclimatiche (paragrafo 3.2.3.2). In questo caso sembra che le simulazioni risentano di più dell'incertezza, rispetto al grano duro, con valori di deviazione standard del flusso di NEE, che oscillano tra i 111,5 e 119,5  $\text{g C m}^{-2}$ . Ciò è probabilmente dovuto alla maggiore sensibilità del modello agli input nella simulazione di erbai, essendo tali colture a basso input di gestione che risentendone di più delle condizioni ambientali rispetto ad i cereali (Abdalla et

al., 2013). Tuttavia le simulazioni ottenute ci forniscono dati ragionevoli, come mostrato da Saggari et al., (2007), in cui i flussi misurati in colture foraggere sia spontanee che a coltivate in ambiente agrario hanno in media un valore di NEE pari a  $-240 \pm 70 \text{ g C m}^{-2}$ . La Fig. 87 mostra nel dettaglio la distribuzione delle simulazioni delle zone provinciali e la loro frequenza relativa. Le classi di frequenza con NEE compresa tra  $-100$  e  $-199 \text{ g C m}^{-2}$  e tra  $-200$  e  $-300 \text{ g C m}^{-2}$  sono state le più frequenti, corrispondendo rispettivamente al 46,4% e 47,0% del totale delle celle simulate. Tuttavia ci sono differenze evidenti tra le zone agroclimatiche. In particolare, le zone collinari (zona 1, 2 e 3) hanno la una maggior frequenza nella classe compresa tra  $-300$  e  $-200 \text{ g C m}^{-2}$  (la zona 3 pari addirittura al 82,5%). Mentre le zone 4 e 5 hanno la classe di frequenza maggiore compresa tra  $-199$  e  $-100 \text{ g C m}^{-2}$ , rispettivamente con valori pari al 52 % ed al 58 %.



**Figura 87.** Distribuzione delle frequenze stimate di emissioni di NEE del trifoglio incarnato in base alle zone provinciali di appartenenza della simulazione regionale.

## 5. Conclusioni

La ricerca affrontata nell'ambito di questa tesi ha cercato di contribuire alla conoscenza dei flussi di gas serra, responsabili del cambiamento climatico, originati durante la coltivazione di sistemi colturali rappresentativi di zone collinari interne del Centro Italia, quali la Provincia di Viterbo. Il monitoraggio dei flussi di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) a livello di sito è stata effettuata con la tecnica eddy covariance (EC), una delle tecniche micrometeorologiche più utilizzate a tale scopo. I risultati della determinazione del bilancio del carbonio (NECB), evidenziano che gli erbai osservati durante le diverse annate agrarie hanno un comportamento di sink rispetto al flusso del carbonio, con il minimo valore registrato nella stagione produttiva 2009-2010 su trifoglio incarnato (  $-25,65 \text{ g C equivalenti m}^{-2}$ ) fino al massimo valore ottenuto nella stagione produttiva 2012-2013 ( $-464,7 \text{ g C equivalenti m}^{-2}$ ) rilevato sulla coltura di erbaio consociato trifoglio incarnato – loietto. Il bilancio del carbonio è risultato positivo (source) durante la stagione produttiva 2010-2011 sulla coltura di frumento duro con un valore pari a  $16,05 \text{ g C equivalenti m}^{-2}$ . Se al tradizionale metodo di calcolo del bilancio del carbonio, vengono considerate ed aggiunte alla stima, le emissioni dovute ad altri gas serra ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) che si sviluppano durante le operazioni colturali (EFO), i valori stimati subiscono un aumento positivo (source) pari ad una quota di circa  $20\text{-}35 \text{ g C equivalenti m}^{-2}$  (GHGb) frutto dei coefficienti di emissione calcolati da Lal, (2004). Tuttavia, nonostante i risultati ottenuti siano in linea con quelli osservati da altri autori in diversi siti sperimentali europei, (Ceschia et al., 2010), vanno esaminati alcuni fattori che determinano un certo margine di incertezza che caratterizzano i risultati ottenuti, come la scelta arbitraria del periodo di calcolo e integrazione della NEE, malfunzionamenti e gap nei dati EC, calcolo delle EFO sulla base di coefficienti. Nonostante le incertezze elencate e il numero limitato di annate agrarie analizzate, la ricerca effettuata sulla stima del bilancio del carbonio a livello di sito, ha contribuito ad ampliare la conoscenza di tali aspetti per alcune colture rappresentative dell'agricoltura del Centro Italia.

Per quanto riguarda la stima dei flussi di NEE a livello Provinciale, la messa a punto del database delle pratiche agricole nella zona del viterbese, si è rivelata una scelta utile, ed abbastanza poco diffusa, in quanto nella maggior parte delle aree agricole italiane tali informazioni vengono estrapolate a campione da studi locali, nella migliore delle ipotesi, o tramite la consultazione di dati presenti in bibliografia, non tenendo conto delle differenze di gestione che ci potrebbero essere tra zone, causate dalla topografia e dalle caratteristiche chimico-fisiche del suolo. L'assemblaggio di tale database ci ha fornito l'input necessario per poter affrontare il caso di studio a livello Provinciale, su come le pratiche agricole associate alla gestione delle colture possono influire sulla distribuzione

spaziale dei flussi di CO<sub>2</sub> (NEE). Tramite il modello di simulazione DNDC 9.5 è stato possibile effettuare un'indagine a livello provinciale dei flussi di NEE che si verificano durante la coltivazione del frumento duro e del trifoglio incarnato. L'uso delle immagini satellitari LANDSAT 5 e la determinazione delle mappe provinciali di NEE ad alta risoluzione (scala 50 m) ci ha permesso di visualizzare in maniera dettagliata la distribuzione spaziale dei flussi di NEE risultanti dalla simulazione con DNDC 9.5. Anche in questo caso i risultati ottenuti sono in linea con le stime di NEE effettuate con lo stesso modello per grandi aree agricole (Tonitto et al., 2007; Lugato et al., 2010; Perlman et al., 2013), confermando la buona capacità di simulazione da parte di tale modello. I flussi simulati sono risultati particolarmente sensibili al contenuto di sostanza organica ed alla densità apparente del suolo (soprattutto nella coltivazione di frumento duro in zone con NEE positivo), in accordo con Abdalla et al., (2009) e Hastings et al. (2010). L'analisi delle simulazioni provinciali di NEE sul trifoglio incarnato si è rilevata particolarmente complessa in quanto il modello ha una parametrizzazione limitata per quanto riguarda le simulazioni ottenute con le colture foraggere, in particolare risultando assente una parametrizzazione per il trifoglio incarnato, tipica coltura di ambienti Mediterranei. Inoltre, come osservato negli studi di Giltrap et al., (2010), il modello DNDC non fornisce buone prestazioni negli ecosistemi in cui la gestione e la fertilizzazione azotata sono bassi o nulli come negli erbai di leguminose. Nel nostro caso solo la produzione di fieno è stata presa in considerazione nella simulazione regionale, quindi il risultato di NEE può avere una fonte di incertezza (Soussana et al., 2004) in quanto la decisione manageriale degli agricoltori su quale tipo di gestione dell'erbaio di trifoglio incarnato è fortemente dipendente dalle condizioni climatiche e dalla domanda dei prodotti agricoli sul mercato locale e nazionale. Questi aspetti non sono stati presi in considerazione durante le simulazioni ma un probabile lavoro futuro sulla gestione dei flussi di NEE anche sul tipo di gestione per la produzione finale della coltura potrebbe essere utile a comprendere tali flussi e diminuire le incertezze (produzione di semente, produzione di foraggio fresco o fieno, gestione del pascolo). Tuttavia nonostante alcune difficoltà incontrate nelle misurazioni in pieno campo dell'anidride carbonica e nell'analisi gascromatografica del protossido d'azoto in laboratorio (che non hanno permesso di aggiungere ulteriori dati sperimentali per quantificare le incertezze dei gas serra nel bilancio del carbonio agricolo, sia a livello di sito che a livello regionale), siamo riusciti a realizzare gli obiettivi prefissati in questa ricerca; ottenere il bilancio del carbonio a livello di sito; assemblare il database delle pratiche agricole regionali; stimare e monitorare il flusso spaziale di NEE di una zona agricola del Centro Italia. La ricerca effettuata in questi anni contribuisce a valutare possibili strategie di mitigazione ed adattamento, da intraprendere in aree agricole medio-grandi, per futuri scenari di mitigazione in agricoltura, che riducano le

emissioni e contribuiscono nell'azione di abbattimento dei gas serra, responsabili del riscaldamento globale.

## Bibliografia

- Abdalla M., Wattenbach M., Smith P., Ambus P., Jones M., Williams M., 2009. Application of the DNDC model to predict emission of N<sub>2</sub>O from Irish agriculture *Geoderma* 151, 327-337.
- Abdalla M., Saunders M., Hastings A., Williams M., Smith P., Osborne B., Lanigan G., Jones B.M., 2013. Simulating the impacts of land use in Northwest Europe on Net Ecosystem Exchange (NEE): The role of arable ecosystems, grasslands and forest plantations in climate change mitigation. *Science of the Total Environment* 465, 325–336.
- AGEA, 2011. Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura. <http://www.agea.gov.it/portal/Osservatorio-statistiche-agricole>.
- Anthoni P.M, Freibauer N., Kolle A.O., Schulze E.D., 2004. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 55-67
- Aubinet M., Grelle, A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30, 113-175
- Aubinet M., Moureaux C., Bodson B., Dufranne D., Heinesch B., Suleau M., Vancutsem F., Vilret A., 2009. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 407-418
- Auble D.L., Meyers, T.P., 1992. An open path, fast response infrared absorption gas analyzer for H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>". *Boundary-Layer Meteorology* 59, 243–256.
- Baldocchi D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9, 479-492.
- Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieur C., 1992. Modeled Analysis of the Biophysical Nature of Spectral Shifts and Comparison with Information Content of Broad Bands. *Remote Sensing of Environment* 41 (2), 133-42.
- Batjes N.H., 1999. Management options for reducing CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 410-200-031. Dutch National Research

Programme on Global Air Pollution and Climate Change. Technical Paper 30, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.

- Beer C., Weber U., Tomelleri E., Carvalhais N., Mahecha M., Reichstein M., 2014. Harmonized European long-term climate data for assessing the effect of changing temporal variability on land-atmosphere CO<sub>2</sub> fluxes. *Journal of Climate*, 27, 13, 2014, 4815-4834.
- Beheydt D., Boeckx P., Sleutel S., Li C., Van Cleemput O., 2007. Validation of DNDC for 22 long-term N<sub>2</sub>O field emission measurements. *Atmospheric Environment* 41, 6196-6211.
- Bellarby J., Foereid B., Hastings A., Smith P., 2008. Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential. Campaigning for Sustainable agriculture. Greenpeace.
- Casa R., Castaldi F., Pompei S., Ponziani S., Rossini F., 2012. Development of high resolution of agricultural cover and management (2005-2010) for the Viterbo Province, Central Italy. Annual meeting GHG-Europe. Poster session 17-20 Aprile, Pitesti Romania.
- Cataldo D.A., Haroon M., Scharader L.E., Young V.L., 1975. Rapid Colorimetric Determination of Nitrate in Plant Tissue by Nitration of Salicylic Acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6, 71-80.
- Ceschia E., Béziat P., Dejoux J.F., Aubinet M., Bernhofer Ch., Bodson B., Buchmann N., Carrara A., Cellier P., Di Tommasi P., Elbers J.A., Eugster W., Grunwald T., Jacobs C.M.J., Jans W.W.P., Jones M., Kutsch W., Lenigan G., Magliulo E., Marloie O., Moors E.J., Moureaux C., Oliso A., Osborne B., Sanz M.J., Saunders M., Smith P., Soegaard H., Wattenbach M., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 363-383.
- Chapuis-Lardy L., Wrage N., Metay A., Chottes J.L., Bernoux M., 2007. Soils, a sink for N<sub>2</sub>O? A review. *Global Change Biology* 13, 1-17.
- Ciais P., Wattenbach M., Vuichard N., Smith P., Piao S.L., Don A., Luyssaert S., Janssens I., Bondeau A., Dechow R., Lelp A., Beer C., Van der Werf G.R., Gervois S., Van Oost K., Tomelleri E., Freibauer A., Schulze E.D., 2009. The European greenhouse gas balance revisited. Part 2: Croplands. *Global Change Biology* 16, 1409-1428.
- Drake B.G., Gonzalez-Meler M.A., Long S.P. (1997) More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 48, 609–639.

- Del Grosso, S.J., Parton, W.J., Mosier, A.R., Hartman, M.D., Brenner, J., Ojima, D.S., Schimel, D.S., 2001. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model, in: Schaffer, M., Ma L., Hansen, S. (Eds.), *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 303-332.
- Díaz-Hernández J.L., 2010. Is soil carbon storage underestimated ? *Chemosphere*, 80: 346-349.
- Eugster W., Moffat A., Ceschia E., Aubinet M., Ammann C., Osborne B., Davis P.A., Smith P., Jacobs C., Moors E., Le Dantec V., Béziat P., Saunders M., Jans W., Grunwald T., Rebmann C., Kutsch W.L., Czerny R., Janous D., Moureaux C., Dufranne D., Carrara A., Magliulo E., Di Tommasi P., Olesen J.E., Schelde K., Oliso A., Bernhofer C., Cellier P., Larmanou E., Loubet B., Wattenbach M., Marloie O., Sanz M.J., Buchmann N., 2010. Management Effect on European Cropland Respiration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 346-362.
- FAO, 2006. World Reference Base for Soil Resources, 2006. *World Soil Resources Reports n. 103*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 65.
- Forgy E. W. 1965. Cluster analysis of multivariate data: efficiency vs interpretability of classifications. *Biometrics* 21, 768–769.
- Gassman P., William J.R., Wang X., Saleh Osei E., Hauck L.M., Izaurralde C., Flowers J.D., 2010. Invited review article: The agricultural policy environmental extender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analysis. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53, 711-740.
- GHG-Europe Database, 2013. Spatial data available in intensive region. Central Italy Cropland species geo-referenced DB. <http://www.europe-fluxdata.eu/ghg-europe/data/spatial-regions>.
- Hannam J.A., Hollis J.M., Jacqueline A., Jones R.J.A., Bellamy P., H., Hayes S. E., Holden A., Van Liedekerke M.H., Montanarella L., 2009. SPADE-2 Soil Profile Analytical Database for Europe Version 2.0 Beta Version March 2009.
- Hartigan J. A., Wong M. A., 1979. A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics* 28, 100–108.
- Hastings A.F., Wattenbach M., Eugster W., Li C., Buchmann N., Smith P., 2010. Uncertainty propagation in soil greenhouse gas emission models: An experiment using the DNDC model and at the Oensingen cropland site. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136, 97-110.

- Haylock M.R., N. Hofstra A.M.G. Klein Tank E.J., Klok P.D. Jones M. N., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal Geophysical Reserch*, 113, 110-119.
- Heiderer R., 2012. EFSA Spatial Data Version 1.1.Data Properties and Processing. Joint Research Centre.Institute for Environment and Sustainability.
- Hipps L.E., Asrar G., Kanemasu E.T., 1983. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. *Agriculture Meteorology*, 28, 253-259.
- Hutchinson G.L., Livingston G.P., 1993. Use of chamber system to measure trace gas fluxes. In: Harper L. et al., editors, *Agriculture ecosystem effects on trace gases and global climate change*. ASA Spec.Publ.55.ASA, CSSA, SSSA, Madison WI. Pages 63-78.
- IMECC, 2007.Infrastructure for Measurements of the European Carbon Cycle, is an Integrated Infrastructure Initiative under the Sixth Framework Programme of the European Commission.
- INSPIRE, 2007: Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community 14 March 2007.
- Institute for the Study of the Earth, Oceans and Space, 2007. User's Guide for the DNDC Model (Version 9.5).Welcome to DNDC. University of New Hampshire.
- IPCC, 2003: Good Practice and Guidance for Greenhouse Gas Inventories for Land Use, Land Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa, Japan.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- IPCC, 2007a. Summary for Policymakers. Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (*IPCC*). In: 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.
- IPCC, 2007b. Summary for Policymakers. Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, April 6th, 2007.

- IPCC, 2007c. Summary for Policymakers. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 30 April - 4 May 2007.
- IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISTAT, 2010. Istituto Nazionale di Statistica. [www.istat.it/it/archivio/agricolturait](http://www.istat.it/it/archivio/agricolturait).
- Jansen E., J. Overpeck, K.R. Briffa J.C. Duplessy F. Joos V., Masson-Delmotte D., Olago B., Otto-Bliesner W.R., Peltier S., Rahmstorf R., Ramesh D., Raynaud D., Rind O., Solomina R., Villalba D., Zhang L., 2007: Paleoclimate. 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, 433-497.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.J., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.D., Valentini R., Dolman A.J., 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science*, 300: 1538-1542.
- Janzen H.H., 2004. Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective. *Agriculture Ecosystem Environment*, 104, 399-417.
- Lal R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environment International* 30, 981-990.
- Leip A., Marchi G., Koeble R., Kempen M., Britz W., Li C., 2008. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe. *Biogeosciences* 5, 73-94.
- LI-COR, 2012. Eddy Pro Software, eddy covariance programme version 5.0. [www.licor/env/products/eddy\\_covariance/eddypro](http://www.licor/env/products/eddy_covariance/eddypro).
- Li C., 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling Agroecosystem* 58, 259-276.

- Li C., Frolking S., Frolking T., 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97, 9759-9776.
- Li C., Narayanan V., Harriss R.C., 1996. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Global Biogeochemical Cycle* 10, 297-306.
- Loague K., Green R. E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51–73.
- Lugato E., Zuliani M., Alberti G., Delle Vedove G., Gioli, B., Miglietta, F., Peressotti A., 2010. Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution. *Agriculture Ecosystems and Environment* 139, 546-556.
- Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C., 2007: Global Climate Projections. 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.
- Mipaaf, 2014. Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, Riforma della PAC 2014-2020. Linee guida per la conservazione e la caratterizzazione della biodiversità vegetale, animale e microbica di interesse per l'agricoltura (<http://www.politicheagricole.it>).
- Moffat A.M, Papale D., Reichstein M., Hollinger D.Y., Richardson A.D., Barr A.G., Beckstein C., Braswell B.H., Churkina G., Desai A.R., Falge E., Gove J.H., Heimann M., Hui D., Jarvis A.J., Kattge J., Noormets A., Stauch V.J., 2007. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 147, 209-232.
- Norby R.J., Wullschleger S.D., Gunderson C.A., Johnson D.W., Ceulemans R., 1999. Tree responses to rising CO<sub>2</sub> in field experiments: Implication for the future forest. *Plant Cell Environment* 22, 683-714.
- Olander L.P., Eagle A.J., Baker J.S., Haugen-Kozyra K., Murray B.C., Kravchenko A., Henry L.R., Jackson R., 2011. Assessing greenhouse gas mitigation opportunities and implementation strategies for agricultural land management in the United States, T-AGG report online. Available at: <http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/t-agg>. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Durham, North Carolina, USA.

- Osborne B., Saunders M., Walmsley D., Jones M., Smith P., 2010. Key questions and uncertainties associated with assessment of the cropland greenhouse gas balance. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 293-301.
- Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D., 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation, *Biogeosciences* 3, 1-13.
- 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 Science Society of America Journal*, 51, 1173-1179.
- Parton W.J., Hartman M.D., Ojima D.S., Schimel D.S., 1998. DAYCENT: its land surface submodel: description and testing. *Global Planet Change* 19, 35-48
- Patrino A., Cavazza L., Castriganò A., 1998. Metodo della pipetta. *Metodi di analisi fisica del suolo. Pagliai Cap III; 8-12* Franco Angeli. Milano
- Perlman J., Hijmans R.J., Horwath W.R., 2013. *Environmental Modelling & Software Agriculture* 48, 183-192.
- Pulleman M.M., Bouma J., van Essen E.A., Meijles E.W., 2000. Soil organic matter content as a function of different land use history. *Soil Science. Society of America Journal*, 64, 689-693.
- Qin X., Wang H., Li Yu., Li Yo, McConkey B., Lemke R., Li C., Brandt K., Gao Q., Wan Y., Liu S., Liu Y., Xu C., 2013. A long-term sensitivity analysis of denitrification and decomposition model. *Environmental Modelling & Software*, 43, 26-36
- R Development Core Team, 2011. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. ISBN 3-900051-07-0 [WWW document]. URL <http://www.R-project.org/>.
- Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grunwald T., Havrankova K., Ilvesniemi H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., Valentini R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 1424-1439.

- Regione Lazio, 2012. Servizio Idrografico e Mareografico di Roma.  
<http://www.idrografico.roma.it/annali>
- Richards J.A., 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin: Springer-Verlag.
- Rosenzweig C., Karoly D., Vicarelli M., Neofotis P., Wu Q., Casassa G., Menzel A., Root T.L., Estrella N., Seguin B., Tryjanowski P., Liu C., Rawlins S., Imeson A., 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453, 353-357.
- Sabbatini S., Arriga N., Bertolini T., Castaldi S., Chiti T., Consalvo C., Djomo S.N., Gioli B., Matteucci G., Papale D., 2015. Greenhouse gases balance of cropland conversion to bioenergy poplar short rotation coppice. *Biogeosciences Discussion*, 12, 8035-8084.
- Saggar S., Hedley C., Giltrap D.L., Lambie S.M. 2007. Measured and modelled estimates of nitrous oxide emission and methane consumption from a sheep grazed pasture. *Agriculture Ecosystem Environment*, 122, 357-365.
- Saxton K.E., Willey P.H., Rawls W.J., 2006. Field and Pond Hydrologic Analyses with the SPAW Model. Proceed. Paper No. 062108, Annual Inter. Meeting, Amer. Soc. Agric. and Biol. Engr., July 9-12, 2006, Portland, OR.
- Schlesinger W.H., 2000. Carbon sequestration in soil: some cautions amidst optimism. *Agriculture Ecosystem Environment*, 82, 121-127.
- Skierucha W., Wilczek A., 2010. A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range. *Sensors*, 10, 3314-3329.
- Sequi P., De Nobili M, 2000. Metodi di analisi chimica del suolo. Franco Angeli, Milano.
- SISS ,1985. Metodi normalizzati di analisi del suolo. Società Italiana Scienza del Suolo. Edagricole
- Smith J.U., Gottschalk P., Bellarby J., Chapman S., Lilly A., Towers W., Bell J., Coleman K., Nayak D.R., Richards M.I., Hillier J., Flynn H.C., Wattenbach M., Aitkenhead M., Yeluripurti J.B., Farmer J., Milne R., Thomson A., Evans C., Whitmore A.P., Falloon P., Smith P. 2010a. Estimating changes in national soil carbon stocks using ECOSSE – a new model that includes upland organic soils. Part I. Model description and uncertainty in national scale simulations of Scotland. *Climate Research* 45, 179-192. doi: 10.3354/cr00899.
- Smith J.U., Gottschalk P., Bellarby J., Chapman S., Lilly A., Towers W., Bell J., Coleman K., Nayak D.R., Richards M.I., Hillier J., Flynn H.C., Wattenbach M., Aitkenhead M., Yeluripurti J.B., Farmer

- J., Milne R., Thomson A., Evans C., Whitmore A.P., Falloon P., Smith, P., 2010b. Estimating changes in national soil carbon stocks using ECOSSE – a new model that includes upland organic soils. Part II. Application in Scotland. *Climate Research* 45, 193-205. doi: 10.3354/cr00902.
- Smith P., Smith J.U., Powlson E., 1997. Evaluation and comparison of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. In: *Evaluation of soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments*. *Geoderma* 81,153-225.
- Smith P., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P., Coleman K., 2000. Meeting Europe's Climate Change Commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology* 6, 525-539.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H.H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes R.J., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith, J.U., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B*. 363, 789-813. doi: 10.1098/rstb.2007.2184
- Smith P., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E. A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., Masera O., Mbow C., Ravindranath N. H., Rice C. W., Robledo Abad C., Romanovskaya A., Sperling F., Tubiello F., 2014. Agriculture Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C.(eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Crippen R., Carabajal C., 2011. Validation Report to the ASTER GDEM Version 2 Validation Team. ASTER Global Digital Elevation.
- Tubiello F.N., Salvatore M., Condor Golec R., Rossi S., Ferrara A., Biancalani R., Federici S., Jacobs H., Flammini A., Olivier J., House J.I., Srivastava N., Smith P., 2015. The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. *Global Change Biology* (online) doi: 10.1111/gcb.12865
- USDA - NRCS.1999. United State Department of Agriculture and Natural Resources Conservation service. *Soil Taxonomy, Second Edition*. Agricultural Handbook n. 436.

- UNFCCC, 2014. United Nations Framework Convention on Climate Change, Lima Climate Change Conference - December 2014, COP-20, Perù.
- Van Wesemael B., Paustian K.H., Andren O., Cerri C.E.P, Dodd M., Etchevers J., Goidts E., Grace P.R, Katterer T., McConkey B.G., Ogle S.M., Pan G., Siebner C., 2011. How can soil monitoring networks be used to improve predictions of organic carbon pool dynamics and CO<sub>2</sub> fluxes in agricultural soils? *Plant and Soil* 338, 247-259.
- Verchot G.L., Davidson E.A., Cattanio J.H., Ackerman I.L, Erickson H.E., Keller M., 1999. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 31-46.
- Wattenbach M., Sus O., Vuichard N., Lehuger S., Gottschalk P., Li L., Leip A., Williams M., Tomelleri E., Kutsch W.L., Buchmann N., Eugster W., Dietiker D., Aubinet M., Ceschia E., Bèziat P., Grunwald T., Hastings A., Osborne B., Ciais P., Cellier P., Smith P., 2010. The carbon balance of European croplands: A cross-site comparison of simulation models. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 139, 419-453.
- Whitmore A.P., 1991. A method for assessing the goodness for computer simulation of soil processes. *Journal of Soil Science* 42, 289-299.