

sheep
to ship
LIFE



Con il contributo dello strumento
finanziario LIFE dell'Unione Europea

LIFE15 CCM/IT/000123

Stima del sequestro di Carbonio nei suoli delle aziende SheepToShip LIFE.

Relazione finale



C.1.1 Studio LCA su latte ovino

Maggio 2021

Language: IT



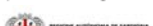
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per la BioEconomia



REGIONE AUTONOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

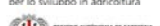
Agris Laore

Agenzia regionale
per la ricerca in agricoltura



uniss

Agenzia regionale
pro s'isvilupu in agricultura
Agenzia regionale
per lo svilupu in agricultura



uniss
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI
agraria
DIPARTIMENTO DI AGRARIA



uniss
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI
disea
DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE E AZIENDALI

Autori

CNR IBE / ISPAAM

Pasquale Arca (IBE)
Enrico Vagnoni (IBE)
Delia Cossu (IBE)
Antonello Franca (ISPAAM)
Pierpaolo Duce (IBE)

Agris Sardegna

Gabriella Serra
Salvatore Contini
Mauro Decandia
Giovanni Molle

Laore Sardegna

Domenico Usai

Dipartimento di Agraria UNISS

Paola Sau
Mondina Lunesu
Alberto Atzori

Coordinato da



CNR IBE

Istituto per la BioEconomia

Executive summary

This document concerns the soil C sequestration estimates of the SheepToShip case study farms.

This study highlights how the estimation of the soil C sequestration can be important in evaluating the emission intensity of extensive and semi-intensive sheep farming systems. It provides useful elements to be integrated into the emissions balance, by varying the environmental performance of production systems in a non-univocal manner, mainly according to the characteristics and peculiarities of the system analyzed.

Sommario

Introduzione	1
Materiali & Metodi	5
Risultati	11
3.1- <i>Sequestro di C nel suolo per kg di latte normalizzato</i>	11
3.2- <i>Sequestro di C nel suolo per ha di Superficie Agricola Utilizzata</i>	12
3.3- <i>Sequestro del C nel suolo nelle aziende raggruppate in base a livello produttivo e zona</i>	13
3.4- <i>Contabilizzazione del sequestro di C nel suolo nella stima del GWP delle 18 aziende</i>	15
Discussione	18
4.1- <i>Sequestro del C nel suolo nelle 18 aziende</i>	18
4.2- <i>Sequestro del C nel suolo nelle aziende raggruppate per macro-aree e livello produttivo</i>	19
4.3- <i>Contabilizzazione del sequestro di C nel suolo nella stima del GWP</i>	21
Conclusioni	24
Bibliografia	26



INTRODUZIONE

La presente relazione è focalizzata sulla stima del sequestro del carbonio (C) nel suolo delle stesse aziende oggetto dello studio di *Life Cycle Assessment* (LCA) implementato nell'ambito del progetto *SheepToShip LIFE - Looking for an eco-sustainable sheep supply chain: environmental benefits and implications*.

SheepToShip LIFE è un progetto che mira allo sviluppo di un modello europeo per la riduzione delle emissioni di gas serra nel settore lattiero-caseario ovino, attraverso la promozione di buone pratiche agro-zootecniche e casearie, basate sull'uso efficiente delle risorse in un'ottica di ciclo di vita. L'obiettivo generale del progetto è di ridurre del 20% in 10 anni le emissioni di gas serra del comparto ovino della Sardegna. La base diagnostica sulla quale insiste la strategia operativa, che dovrebbe portare al raggiungimento di tale obiettivo, è uno studio LCA condotto su 18 aziende ovine e 3 caseifici. In particolare, per la categoria di impatto *Climate Change*, la più importante ai fini del progetto, è stato utilizzato l'indicatore *Global Warming Potential* (GWP), che esprime il potenziale emissivo (gas serra emessi nell'atmosfera) in termini di kg di CO₂ equivalente rispetto all'unità funzionale considerata. In questo tipo di stima ambientale dei sistemi agro-zootecnici, la capacità di sequestrare C nel suolo assume notevole importanza come elemento di compensazione delle emissioni. Il sequestro del C nel suolo corrisponde a una variazione temporale positiva dello stock di C nel substrato pedologico, che comporta una variazione negativa della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Le superfici agricole sulle quali vengono condotte le attività zootecniche rappresentano dei bacini potenziali di accumulo di C (FAO, 2019). Lo stock di C nel suolo può variare nel tempo, in relazione alla gestione delle superfici agricole che possono essere investite a prato, a pascolo naturale o a erbaio. È dimostrato che l'adozione di buone pratiche agronomiche, come per esempio la gestione razionale dei carichi e dei turni di pascolamento, gli interventi di miglioramento della produttività dei pascoli naturali, la riduzione dell'intensità e della frequenza delle lavorazioni, favorisce positivamente il sequestro di C nel suolo (Conant et al., 2017). Tuttavia, la variazione del contenuto di C nel suolo è influenzata da molteplici fattori, in particolare fattori di origine abiotica che caratterizzano le condizioni ambientali del sito. Per quantificare gli effetti delle pratiche gestionali sulla variazione dello stock di C è indispensabile monitorare le variazioni nel lungo periodo; in alternativa, si può fare ricorso a modellizzazioni temporali e spaziali del contenuto di C nel suolo (FAO, 2019). Come riportato nelle linee guida FAO (2019) per la



misurazione delle variazioni dello stock di C nel suolo dei sistemi produttivi zootecnici (*Livestock Environmental Assessment and Performance, LEAP*) (FAO, 2019), esistono tre diversi approcci di modellizzazione, che corrispondono a tre diversi livelli di valutazione, scelti principalmente in funzione dello scopo, della scala spaziale e dei dati disponibili dello studio in questione: i) modelli empirici (es. IPCC, 2006), adatti alla redazione di report approssimativi a scala globale, ma poco precisi a scala regionale o locale; ii) modelli di processo che simulano la dinamica del C organico nel suolo, in breve modelli di processo-suolo (es. C-TOOL, Roth-C, etc.), adatti per stimare variazioni dello stock di C nel suolo su scala locale, quando sono disponibili dati di C input e di parametri pedoclimatici caratterizzanti il sito. Tuttavia, non simulano altri importanti processi come l'effetto della crescita della biomassa radicale e del soprassuolo; iii) modelli di processo eco-sistemici (es. EPIC, CENTURY, etc.), adatti per stimare la dinamica dello stock di C nel suolo in relazione a differenti gestioni agronomiche o pratiche colturali, oltre che per simulare la risposta produttiva delle piante e le variazioni di C nel suolo in scenari futuri di cambiamento climatico. Nella Tabella 1 sono riportati, sinteticamente, i livelli di accuratezza dei tre approcci di stima in relazione ai differenti contesti operativi e agli scopi dello studio.

Tabella 1. Elenco degli scopi della modellizzazione e corrispettivo grado di accuratezza e validità dei tre modelli (fonte: FAO, 2019).

Scopo dello studio	Livello 1 - modello empirico	Livello 2 - modello di processo suolo	Livello 3 - modello di processo eco-sistemico
Bilancio a scala nazionale	Verde	Verde	Verde
Comparazione tra pratiche di gestione	Giallo	Verde	Verde
Ottimizzazione dei servizi ecosistemici	Giallo	Giallo	Verde
Scenari di cambiamento climatico	Rosso	Rosso	Verde
Benchmarking	Verde	Verde	Verde
Valutazioni del ciclo di vita	Giallo	Verde	Verde
Comparazione incrociata (compresi altri gas serra)	Rosso	Rosso	Verde
Modellizzazione 2-3D (profondità del profilo, flusso laterali)	Rosso	Rosso	Giallo
Upscaling	Verde	Verde	Verde
Valutazione dell'azienda agricola commerciale	Verde	Giallo	Rosso

(rosso = non valido; giallo = limitatamente accurato e accettato; verde = valido e utilizzato comunemente)



Come si può osservare dalla Tabella 1, nell'analisi LCA la variazione dello stock di C nel suolo può essere stimata con ragionevole accuratezza mediante l'utilizzo di modelli di processo-suolo (Livello 2) o con modelli di processo eco-sistemici (Livello 3). Tuttavia, l'inclusione della stima del sequestro del C nel suolo nel bilancio delle emissioni non è ancora formalmente accettata dalla comunità scientifica dell'LCA. La variazione del livello di C nel suolo è considerata come variazione dello stock di C nel suolo e, quindi, viene esclusa dalla valutazione ambientale della categoria di impatto "Climate Change" (EDA, 2018). Inoltre, il principio metodologico che esclude il conteggio del sequestro del C nel suolo dalla stima del GWP è riconducibile al fatto che il C sequestrato temporaneamente nel suolo può essere riemesso nel futuro, annullando l'effetto di contro-bilanciamento delle emissioni in atmosfera. D'altro canto, come sottolineato da Levasseur et al. (2013), diversi ricercatori sostengono l'importanza di quantificare e includere la variazione dello stock di C nel suolo nei calcoli LCA, in quanto il C rimosso dall'atmosfera e stoccato temporaneamente nel suolo determina una riduzione della pressione cumulativa radiativa in quell'arco temporale, riducendo, conseguentemente, l'impatto sul clima. Di fatto, non esiste una metodologia standard riconosciuta a livello internazionale per la quantificazione del sequestro del C nel suolo nell'analisi LCA dei sistemi agricoli (Brandão e i Canals, 2013; Petersen et al., 2013; Arzoumanidis et al., 2014). Tuttavia sono disponibili dei modelli di stima adattabili a seconda del contesto e del tipo di studio (Nayak et al., 2019). Nel progetto SheepToShip LIFE la stima del sequestro del C dei sistemi produttivi ovini è stata condotta applicando il metodo di Petersen et al. (2013), basato sull'utilizzo di un modello che simula la dinamica del C organico nel suolo (Livello 2, Tabella 1), come consigliato dalla FAO (FAO, 2019).

In Sardegna, i sistemi produttivi basati sull'allevamento della pecora da latte sono sistemi 'misti', in cui l'autoproduzione di granelle e foraggi (freschi e conservati) costituisce l'alimento principale del gregge. Esiste un'ampia variabilità strutturale tra le diverse aziende dislocate sull'isola, legata principalmente alle potenzialità produttive dell'area in cui ricadono. I sistemi più intensivi sono presenti principalmente nelle aree pianeggianti del Nord e del Sud Sardegna, caratterizzate da un substrato pedologico sedimentario, in cui gli ordinamenti colturali sono costituiti, prevalentemente, da colture annuali (erbai). I sistemi più estensivi, invece, si trovano nella zona centrale della Sardegna, caratterizzata da aree collinari e montuose, e da substrati basaltici e granitici, con presenza più o meno diffusa di copertura arborea. Le caratteristiche morfo-pedologiche delle aree basaltiche e granitiche del Centro



Sardegna non consentono un ricorso intenso e frequente alle lavorazioni del suolo, per cui soltanto ridotte superfici vengono investite a erbaio, mentre la maggior parte dei terreni sono adibiti a pascoli naturali e prato-pascoli permanenti. Questa variabilità strutturale si ripercuote sulle prestazioni ambientali dei diversi sistemi produttivi, con risultati differenti a seconda dell'unità funzionale alla quale sono riferiti i valori di GWP. Conseguentemente, anche la capacità di sequestro di C nel suolo potrebbe essere influenzata dalle caratteristiche del sistema produttivo: erbaio e pascolo naturale hanno differenti performance in termini di conservazione della sostanza organica del suolo. I sistemi basati sui pascoli naturali e sui prato-pascoli permanenti hanno maggiore attitudine al sequestro del C nel suolo (King and Blesh, 2018; Gislou et al., 2020), mentre i sistemi basati sugli erbai hanno ridotte capacità di conservazione della sostanza organica, a causa dei processi di mineralizzazione favoriti dalle frequenti lavorazioni (Six et al., 2004; Acar et al., 2018). Pertanto, considerate le diversità strutturali dei sistemi ovini sardi, la stima del sequestro del C è estremamente utile al fine di ottenere una valutazione bilanciata, completa e attendibile delle prestazioni ambientali dei sistemi produttivi.

L'obiettivo di questo lavoro è di integrare gli studi LCA effettuati in SheepToShip LIFE con la quantificazione della capacità di sequestro di C nel suolo dei vari sistemi ovini analizzati.



MATERIALI & METODI

Il modello di Petersen et al. (2013), utilizzato esclusivamente per studi LCA in ambito agro-zootecnico, stima il sequestro del C nel suolo a partire dai residui organici lasciati al suolo sotto forma di biomassa vegetale (residui della biomassa del soprassuolo e biomassa radicale) ed escrezioni animali. L'approccio di stima è basato sulla modellizzazione di due flussi: i) dal suolo all'atmosfera, che corrisponde al processo di mineralizzazione della sostanza organica, simulato da Petersen et al. (2013) mediante l'utilizzo del modello C-TOOL; ii) dall'atmosfera al suolo, che corrisponde al decadimento della CO₂ atmosferica, simulata mediante l'utilizzo del modello del ciclo del C di Bern. Gli sviluppatori del modello di Petersen et al. (2013) hanno stimato che il 9.7% del C lasciato al suolo come residuo organico alla fine del periodo oggetto di analisi (un anno) è sequestrato dal suolo in una prospettiva temporale di 100 anni. Il modello consente di utilizzare dati sito-specifici di C input in base alle reali condizioni di campo (Batalla et al., 2015). Inoltre, la prospettiva temporale sulla quale si base la stima è in linea con l'orizzonte temporale del GWP (100 anni). Diversi autori hanno utilizzato recentemente il modello di Petersen et al. (2013) per la stima del sequestro del C nell'ambito di studi LCA di allevamenti ovini e caprini da latte in ambiente mediterraneo (Gutiérrez-Peña et al., 2019; Escribano et al., 2020; Arca et al., 2021) o in altre regioni dell'Europa Occidentale (Knudsen et al., 2019).

In questo lavoro, il modello di Petersen et al. (2013) è stato utilizzato in maniera empirica, analogamente a quanto è stato fatto da altri autori in studi simili al nostro. Concretamente, la stima del sequestro del C nel suolo nelle 18 aziende analizzate è stata condotta applicando il coefficiente di 9.7% ai residui organici rimasti al suolo (stimati) alla fine dell'annata agraria di riferimento (ottobre 2016 – settembre 2017). Come accennato sopra, i residui organici (o C input) appartengono a due macrocategorie: i) residui vegetali proveniente dalle colture erbacee, rappresentati dai residui epigei e dalla biomassa ipogea, a sua volta costituita da due componenti: biomassa radicale e rizodeposizioni (o essudati radicali) – nella stima non sono stati considerati i residui vegetali provenienti dalla componente arborea; ii) le escrezioni animali (feci) lasciate al suolo durante il pascolamento. La quantità di C derivante dalle escrezioni animali è stata stimata applicando il coefficiente di 13.4 (Escudero et al., 2012), che esprime il rapporto C:N delle feci, alla quantità di N fecale escreto dagli animali, a sua volta stimata con il modello di Decandia et al. (2011) per le varie categorie animali e utilizzando i fattori di emissione suggeriti dall'IPCC (2019). I residui vegetali sono stati trasformati in C applicando il



coefficiente di 0.4 (Burle et al., 1997; dos Santos et al., 2011) alla biomassa secca, ad eccezione del silo-mais, in cui la quantità di C lasciata al suolo a fine ciclo è stata stimata applicando il coefficiente di 0.11 (Lai et al., 2017) alla resa della coltura. I residui vegetali sono stati stimati a partire dai valori di resa delle colture, mediante applicazione di specifiche equazioni e coefficienti ricavati dalla letteratura scientifica a seconda del tipo di coltura, destinazione d'uso e gestione agronomica (irrigazione e concimazione). I valori di resa in granella, paglia (asportata), fieno e insilato sono stati quantificati dagli allevatori e registrati durante la raccolta dati per l'LCA. I valori della biomassa pascolata (foraggio verde o stoppie) sono stati stimati sulla base delle rese in fieno (quantificate nell'inventario LCA) di erbai e pascoli naturali simili presenti nella stessa azienda o in aziende limitrofe, e gestiti con medesima tecnica agronomica. Nel caso in cui la tecnica agronomica differisse, sono stati applicati dei coefficienti di correzione delle rese: i) le rese degli erbai irrigui sono state ottenute dividendo il valore delle rese in fieno degli erbai in asciutto per 0.684 (Martiniello et al., 2007); ii) la biomassa pascolata degli erbai pascolati nel periodo autunno-vernino e affienati a fine primavera (dual purpose) è stata stimata moltiplicando la resa in fieno per i coefficienti 0.33 e 0.26 (Pires et al., 2005), rispettivamente per erbai non concimati e concimati; iii) la biomassa pascolata degli erbai pascolati nel periodo autunno-vernino e trebbiati a fine primavera (dual purpose), è stata stimata moltiplicando la resa in granella e paglia (asportata) per il coefficiente 0.33 (Francia et al., 2006); iv) la biomassa pascolata nel periodo autunno-vernino del prato di erba medica successivamente affienato nel periodo estivo è stata stimata moltiplicando la biomassa affienata al primo taglio per il coefficiente 0.38 (Chocarro et al., 2005). La resa del sulletto pascolato è stata stimata in base ai valori di resa in fieno riportati da Sulas et al. (2009). Nella Tabella 2 sono riportate, sinteticamente, le equazioni, i coefficienti e i relativi riferimenti bibliografici utilizzati per la stima dei residui epigei delle colture erbacee. Analogamente, nella Tabella 3 sono riportati gli stessi dettagli necessari per la stima della biomassa ipogea. Le rizodeposizioni per ciascuna coltura sono state stimate applicando il coefficiente di 0.65 (Bolinder et al., 2007) al valore della biomassa radicale. Quest'ultima è stata stimata applicando dei coefficienti di Shoot/Root (o Root/Shoot), che indicano il rapporto tra biomassa epigea e ipogea (o viceversa), ai valori di biomassa epigea totale che comprende, complessivamente, le rese e i residui epigei, in parte quantificati (rese riportate nell'LCA) e in parte stimati. Nel caso del pascolo naturale e del prato di erba medica, la



biomassa radicale è stata stimata come incremento annuo, dividendo il valore ottenuto per la durata pluriennale della coltura (Arca et al., 2021).

I valori di sequestro del C nel suolo delle 18 aziende, stimati con il modello di Petersen et al. (2013), sono espressi in kg di CO₂ e riferiti a due differenti unità funzionali: 1 ha di Superficie Agricola Utilizzata (SAU) e 1 kg di latte normalizzato. Successivamente, l'intero dataset è stato suddiviso in due gruppi alternativi in base alla zona pedoclimatica (terreni alluvionali delle pianure Nord e Sud, terreni granitici e basaltici delle zone collinari e montuose del Centro) e al livello di produttività (<130 e >130 L latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹). Tale suddivisione è stata eseguita coerentemente allo studio LCA. Test statistici sono stati effettuati sulla nuova suddivisione del dataset per verificare se ci fossero differenze significative tra gruppi (alternativamente per il fattore "zona" e per il fattore "produttività") per le due variabili analizzate (kg CO₂ sequestrati per ha SAU e per kg di latte normalizzato). La scelta dei test statistici da applicare è stata fatta in seguito a test preliminari di analisi delle varianze e di distribuzione della popolazione di campioni. È stato effettuato il Kruskal-Wallis e il Wilcox test per campioni omoschedastici con distribuzione non normale (sequestro di C espresso per kg di latte normalizzato, per entrambe i fattori discriminanti), ANOVA a una via per campioni omoschedastici con distribuzione normale (sequestro di C espresso per ha SAU, con gruppi distinti per livello di produttività) e Welch's ANOVA test a una via per campioni eteroschedastici con distribuzione normale (sequestro di C espresso per ha SAU, con gruppi distinti per zona), con livello di significatività (P-value) pari a 0.05. Tutti i test sono stati effettuati con il software R (R Core Team, 2015).

Tabella 2. Equazioni, coefficienti e riferimenti bibliografici utilizzati per la stima dei residui epigei.

Tipologia di residuo	Equazione	Acronimi	Coefficienti	Riferimenti
Residuo post fienagione	" <i>Resa fieno x i_(f)</i> "	i _(f) = indice di residuo post fienagione rispetto alla biomassa affienata	i _(f) = 0.185	Lai et al., 2017

			HI avena = 0.325	Francia et al., 2006
Residuo post trebbiatura, con asportazione di paglia	“(Resa in granella / HI) – Resa in granella – Resa in paglia”	HI = harvest index, frazione della granella rispetto alla biomassa epigea totale	HI orzo = 0.3975 HI frumento = 0.39 HI triticale = 0.32 HI favino = 0.31 HI lupino = 0.27	Francia et al., 2006 Giunta et al., 2007 Giunta et al., 2020 Giambalvo et al., 2012; Munoz-romero et al., 2011 Sulas et al., 2016
Residuo post pascolamento foraggio verde	“(Biomassa pascolata / $i_{(p)}$) $\times (1 - i_{(p)})$ ”	$i_{(p)}$ = indice della biomassa verde pascolata rispetto alla biomassa epigea totale	$i_{(p)} = 0.77$	Seddaiu et al., 2018
Residuo post pascolamento stoppie	“(Resa stoppie \times $i_{(s)}$ ”	$i_{(s)}$ = indice di residuo post pascolamento stoppie rispetto alla resa stoppie	$i_{(s)} = 0.47$	Hunt et al., 2016

Tabella 3. Equazioni, coefficienti e riferimenti bibliografici utilizzati per la stima dei residui ipogei.

Tipo di coltura	Equazione	Acronimi	Coefficienti	Riferimenti
Erbai annuali destinati alla produzione di pascolo, fieno, granella, paglia, stoppie e “dual purpose”	$ \begin{aligned} & \text{“Biomassa epigea} \\ & \text{totale} \times i(R:S) \times [(1 \\ & + i_{(Riz)}]” \\ & \text{Oppure} \\ & \text{“Biomassa epigea} \\ & \text{totale} \times i(S:R)^{-1} \times [(1 \\ & + i_{(Riz)}]” \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & i(R:S) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa radicale e} \\ & \text{biomassa epigea} \\ & \\ & i(S:R) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa epigea e} \\ & \text{biomassa radicale} \\ & \\ & i_{(Riz)} = \text{indice di} \\ & \text{rizodeposizione, calcolato} \\ & \text{come frazione della} \\ & \text{biomassa radicale} \\ & \\ & i(R:S) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa radicale e} \\ & \text{biomassa epigea} \\ & \\ & i(S:R) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa epigea e} \\ & \text{biomassa radicale} \\ & \\ & i_{(Riz)} = \text{indice di} \\ & \text{rizodeposizione, calcolato} \end{aligned} $	$i(R:S) \text{ favino} = 0.6$	Munoz-Romero et al., 2011
			$i(S:R) \text{ avena} = 2.60$	Radicetti et al., 2019
			$i(S:R) \text{ loiessa} = 2.00$	Lai et al., 2017;
			$i(S:R) \text{ orzo} = 4.49$	Bolinder et al., 2007
			$i(S:R) \text{ cicoria} = 2.27$	Plaza Bonilla et al., 2014
			$i(S:R) \text{ trifoglio} \\ \text{alessandrino} = 3.775$	Sulas et al., 2009
			$i(S:R) \text{ lupino} = 8.07$	Iannucci e Martiniello, 2000
			$i(S:R) \text{ triticale} = 5.35$	Sulas et al., 2016
			$i(S:R) \text{ frumento} = 4.49$	Bolinder et al., 1997
			$i_{(Riz)} = 0.65$	Plaza Bonilla et al., 2014
Pascolo naturale e prato di erba medica	$ \begin{aligned} & \text{“[Biomassa epigea} \\ & \text{totale} \times i(R:S) \times t^{-1}] \\ & + [\text{Biomassa epigea} \\ & \text{totale} \times i(R:S) \times \\ & i_{(Riz)}]” \\ & \text{Oppure} \\ & \text{“[Biomassa epigea} \\ & \text{totale} \times i(S:R)^{-1} \times t^{-1}] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & i(R:S) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa radicale e} \\ & \text{biomassa epigea} \\ & \\ & i(S:R) = \text{indice di rapporto} \\ & \text{tra biomassa epigea e} \\ & \text{biomassa radicale} \\ & \\ & i_{(Riz)} = \text{indice di} \\ & \text{rizodeposizione, calcolato} \end{aligned} $	$i(R:S) \text{ pascolo} \\ \text{naturale} = 4.224$	Mokany et al., 2005
			$i(R:S) \text{ erba medica} \\ = 1.305 \text{ e } 0.635, \\ \text{rispettivamente} \\ \text{per coltura gestita} \\ \text{in asciutto e in} \\ \text{irriguo}$	PhD thesis of Zahid 2009
			$t \text{ pascolo naturale} = 50$	Da inventario LCI



+ [Biomassa epigea come frazione della t prato di erba Da inventario LCI
totale $\times i(S:R)^{-1} \times$ biomassa radicale medica = 5
 $i_{(Riz)}$ "]

t = durata della coltura



RISULTATI

3.1- SEQUESTRO DI C NEL SUOLO PER KG DI LATTE NORMALIZZATO

I valori più alti del sequestro di C nel suolo sono stati osservati nelle aziende insediate nell'area granitica che, mediamente, mostrano una capacità di sequestro di C nel suolo pari a 2.4 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato. L'azienda A12 è, in assoluto, l'azienda che ha mostrato maggiori capacità di sequestro di C nel suolo con 3.3 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato. Tra le altre aziende site nell'area granitica, le aziende A9 e A8 mostrano valori di sequestro del C nel suolo maggiori alla media dell'area (rispettivamente 2.9 e 2.8 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato), mentre le aziende A10 e A11 mostrano valori inferiori alla media dell'area (rispettivamente 1.6 e 1.3 kg di CO₂ sequestrati per kg di latte normalizzato).

Le aziende dell'area basaltica mostrano, mediamente, un valore del sequestro di C nel suolo inferiore a quello delle aziende dell'area granitica, con 2.0 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato. Tra tutte, l'azienda A4 è quella che mostra valori sopra la media dell'area di riferimento: con 3.0 kg di CO₂ sequestrati per kg di latte normalizzato è la seconda azienda in assoluto con le maggiori capacità di sequestro. Le aziende A1 e A3 sequestrano più della media dell'area di riferimento (rispettivamente 2.2 e 2.1 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato), mentre le aziende A2 e A5 sequestrano meno della media dell'area (rispettivamente 1.7 e 1.2 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato).

Le aziende ubicate su substrato sedimentario del Nord Sardegna, mediamente, sequestrano 1.5 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato. Le aziende A14 e A13 mostrano valori di sequestro del C nel suolo superiori alla media dell'area (rispettivamente 2.9 e 1.6 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato), mentre le aziende A15 e A16 sequestrano meno della media dell'area (0.8 e 0.6 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato).

Le aziende insediate su substrato sedimentario del Sud Sardegna, invece, sono quelle che hanno mostrato minori capacità di sequestro di C nel suolo, mediamente pari a 0.7 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato. L'azienda A18, con 0.5 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato, è l'azienda con la più bassa capacità di sequestro per kg di latte normalizzato tra le 18 aziende analizzate. Soltanto l'azienda A19 mostra valori di sequestro del C nel suolo superiori alla media dell'area di riferimento (0.9 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato), mentre le aziende A17 e A20 (oltre alla già citata azienda A18) sequestrano



meno della media dell'area di riferimento (rispettivamente 0.7 e 0.6 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato).

3.2- SEQUESTRO DI C NEL SUOLO PER HA DI SUPERFICIE AGRICOLA UTILIZZATA

I valori medi per area del sequestro di C nel suolo riferiti all'ha di SAU seguono lo stesso ordine decrescente dei valori medi per area riferiti al kg di latte normalizzato, ad eccezione delle aree basaltiche e granitiche, che appaiono invertite in classifica. Infatti, le aziende dell'area basaltica hanno, mediamente, maggiori capacità di sequestro di C nel suolo per ha di SAU rispetto alle aziende dell'area granitica (1,184 vs 1,074 kg di CO₂ per ha di SAU, rispettivamente). Con 1,375 kg di CO₂ sequestrati per ha di SAU, l'azienda A2 è la prima tra le aziende dell'area basaltica e, in assoluto, la seconda nella classifica generale. Le aziende A5 e A4 mostrano valori di sequestro del C nel suolo superiori alla media dell'area basaltica (rispettivamente 1,241 e 1,204 kg di CO₂ per ha di SAU), mentre le aziende A3 e A1 sequestrano meno C per ha di SAU della media della medesima area (rispettivamente 1,172 e 927 kg di CO₂ per ha di SAU). L'azienda A12, similmente a quanto osservato per i valori di sequestro del C nel suolo per kg di latte normalizzato, è la prima tra le aziende dell'area granitica anche per i valori di sequestro di C nel suolo (1,154 kg di CO₂) riferiti all'ha di SAU. Oltre all'azienda A12, soltanto l'azienda A9 mostra valori di sequestro del C nel suolo superiori al valore medio dell'area di riferimento (1,131 kg di CO₂ per ha di SAU), mentre le altre tre aziende (A8, A11 e A 10) sequestrano meno della media dell'area granitica (rispettivamente 1,057, 1,047 e 983 kg di CO₂ per ha di SAU).

Le aziende insediate nelle aree sedimentarie del Nord e del Sud Sardegna mostrano valori medi di sequestro di C nel suolo rispettivamente di 1,024 e 720 kg di CO₂ per ha di SAU. Tuttavia, nell'area del Nord Sardegna è presente l'azienda che sequestra maggiori quantità di C nel suolo tra le 18 aziende monitorate: l'azienda A14, infatti, detiene il primato con 1,398 kg di CO₂ sequestrati per ha di SAU. Le aziende A15 e A16 sequestrano meno della media del C sequestrato nell'area Nord (rispettivamente 812 e 701 kg di CO₂ per ha di SAU), mentre l'azienda A13 mostra valori superiori alla media dell'area (1,186 kg di CO₂ sequestrati per ha di SAU). Al Sud, le aziende A19 e A20 mostrano valori superiori alla media dell'area (rispettivamente 880 e 881 kg di CO₂ sequestrati per ha di SAU), mentre le restanti due



aziende (A17 e A18) mostrano valori più bassi della media del C sequestrato dalle quattro aziende della medesima area (rispettivamente 605 e 514 kg di CO₂ sequestrati per ha di SAU).

Tabella 4. Valori del sequestro di C nel suolo stimati con il modello di Petersen et al. (2013) nelle 18 aziende, espressi in kg di CO₂ per ha di superficie agricola utilizzata (SAU) e per kg di latte normalizzato (LN).

Azienda	SAU (ha)	Produzione per capo (kg LN/capo/anno)	Area	Cseq (kg CO ₂ ha ⁻¹ SAU)	Cseq (kg CO ₂ kg LN ⁻¹)
A1	66.50	129	Basalto	927	2.2
A2	58.00	107	Basalto	1,375	1.7
A4	178.00	106	Basalto	1,204	3.0
A5	56.14	181	Basalto	1,241	1.2
A3	47.00	96	Basalto	1,172	2.1
A12	154.00	120	Granito	1,154	3.3
A8	79.33	130	Granito	1,057	2.8
A10	134.47	105	Granito	983	1.6
A9	72.30	101	Granito	1,131	2.9
A11	41.00	96	Granito	1,047	1.3
A15	71.68	222	Nord	812	0.8
A14	126.00	151	Nord	1,398	2.9
A13	51.75	168	Nord	1,186	1.6
A16	68.00	175	Nord	701	0.6
A17	56.77	188	Sud	605	0.7
A18	86.48	255	Sud	514	0.5
A19	40.66	121	Sud	880	0.9
A20	182.29	227	Sud	881	0.6

3.3- SEQUESTRO DEL C NEL SUOLO NELLE AZIENDE RAGGRUPPATE IN BASE A LIVELLO PRODUTTIVO E ZONA

Considerando la zona come fattore discriminante e riferendo il sequestro del C nel suolo al kg di latte normalizzato, le 10 aziende site nelle aree basaltiche e granitiche della Sardegna centrale sequestrano mediamente una quantità di C nel suolo maggiore rispetto alle 8 aziende insediate nelle aree sedimentarie delle pianure del Nord e del Sud Sardegna (2.2 vs 1.1 kg di CO₂ per kg di latte normalizzato,



rispettivamente) (Tabella 5). Lo stesso risultato è stato osservato per i valori di sequestro del C nel suolo riferiti all'ha di SAU, dove le 10 aziende site in area basaltica e granitica mostrano mediamente una capacità di sequestro significativamente maggiore rispetto alle 8 aziende dislocate nelle aree del Nord e Sud Sardegna (1,129 vs 872 kg di CO₂ per ha di SAU) (Tabella 5). Tuttavia, è doveroso sottolineare che due aziende (A14 e A13) dell'area Nord mostrano maggiori capacità di sequestro di C nel suolo per ha di SAU e per kg di FPCM di alcune aziende site in area Basaltica e Granitica.

Tabella 5. Sequestro di C nel suolo stimato con il modello di Petersen et al. (2013), espresso in termini di CO₂ sequestrata nel suolo per kg di latte normalizzato e per ha di SAU, nei due gruppi di aziende distinte per area geografica e substrato pedologico (zona) della Sardegna.

Gruppo	Zona	N. aziende	Sequestro di C
<i>Sequestro di C (kg CO₂ sequestrati nel suolo) per kg di latte normalizzato</i>			
1	Aree basaltiche e granitiche della Sardegna centrale	10	2.2 (a)
2	Aree sedimentarie del Nord e Sud Sardegna	8	1.1 (b)
<i>Sequestro di C (kg CO₂ sequestrati nel suolo) per ha di SAU</i>			
1	Aree basaltiche e granitiche della Sardegna centrale	10	1,129 (a)
2	Aree sedimentarie del Nord e Sud Sardegna	8	872 (b)

Le lettere indicano differenze significative tra i gruppi (P-value = 0.05)

Considerando il livello produttivo come fattore discriminante, le nove aziende meno produttive (< 130 kg latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹) mostrano mediamente valori di sequestro del C nel suolo maggiori rispetto alle nove aziende più produttive (> 130 kg latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹), con rispettivi valori di 2.1 e 1.3 kg di CO₂ sequestrati per kg di latte normalizzato (Tabella 6). Anche in questo caso è doveroso evidenziare che 4 aziende (A14, A8, A13 e A5) appartenenti al gruppo delle aziende più produttive mostrano maggiori capacità di sequestro di C per kg di latte normalizzato rispetto ad alcune aziende appartenenti al gruppo di aziende meno produttive. Quando il sequestro di C viene riferito



all'ha di SAU, non si osservano differenze significative tra i due gruppi di aziende con differenti livelli di produttività, con valore medio di 1,015 kg di CO₂ per ha di SAU (Tabella 6).

Tabella 6. Sequestro di C nel suolo stimato con il modello di Petersen et al. (2013), espresso in termini di CO₂ sequestrata nel suolo per kg di latte normalizzato e per ha di SAU, nei due gruppi di aziende distinte per livello di produttività media per capo.

Gruppo	Livello produttivo	N. aziende	Sequestro di C
<i>Sequestro di C (kg CO₂ sequestrati nel suolo) per kg di latte normalizzato</i>			
1	Basso (<130 L latte normalizzato capo ⁻¹ anno ⁻¹)	9	2.1 (a)
2	Alto (>130 L latte normalizzato capo ⁻¹ anno ⁻¹)	9	1.3 (b)
<i>Sequestro di C (kg CO₂ sequestrati nel suolo) per ha di SAU</i>			
1	Basso (<130 L latte normalizzato capo ⁻¹ anno ⁻¹)	9	1,097
2	Alto (>130 L latte normalizzato capo ⁻¹ anno ⁻¹)	9	933

Le lettere indicano differenze significative tra i gruppi (P-value = 0.05)

3.4- CONTABILIZZAZIONE DEL SEQUESTRO DI C NEL SUOLO NELLA STIMA DEL GWP DELLE 18 AZIENDE

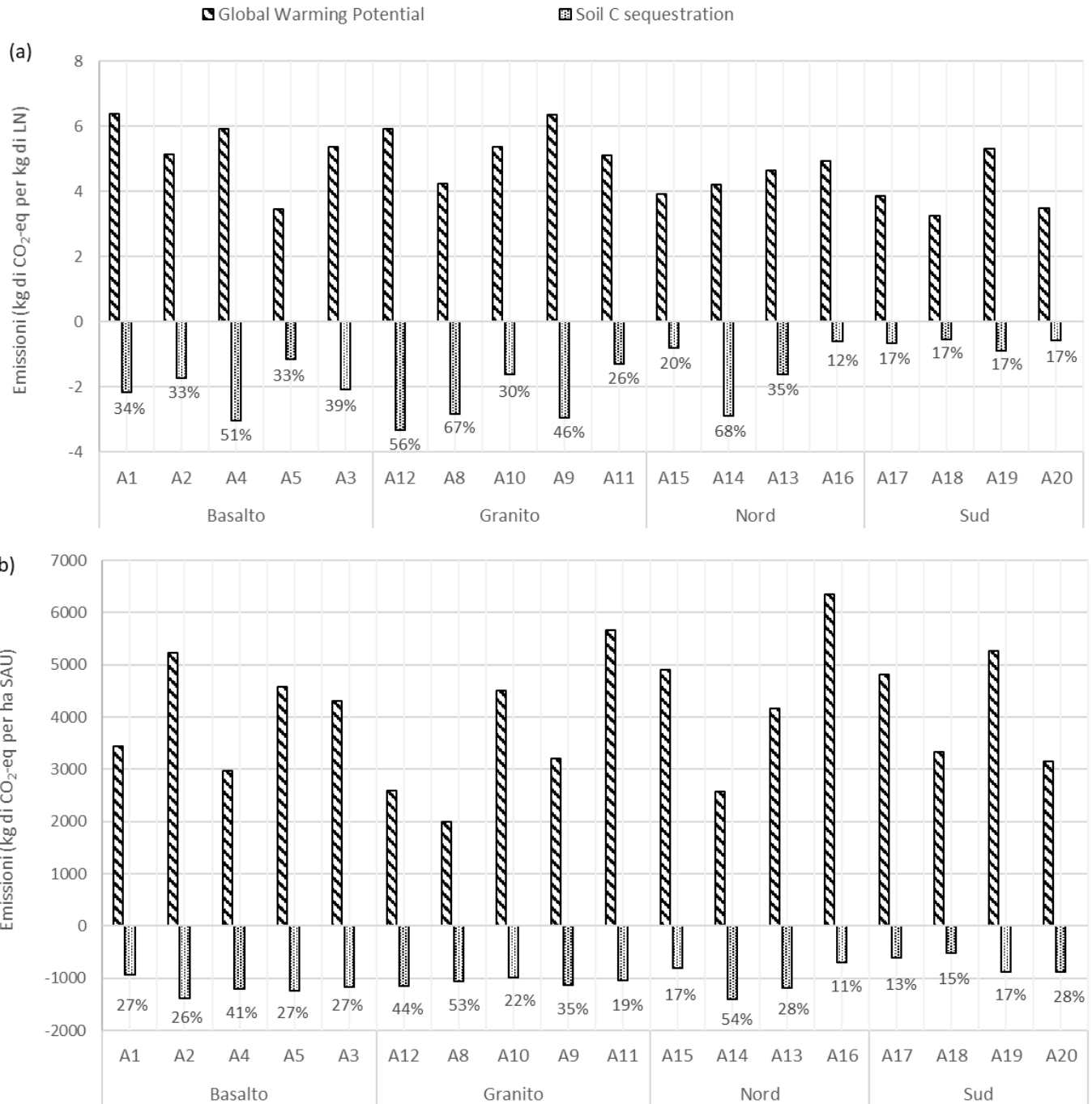
In tutte le 18 aziende analizzate, i valori di sequestro del C nel suolo sono inferiori ai valori di GWP (Figura 1). Di conseguenza, la somma algebrica dei valori di soil C sequestration e GWP in ciascuna azienda fornisce valori positivi, a prescindere dall'unità funzionale utilizzata (kg di latte normalizzato o ha di SAU). La maggiore riduzione percentuale determinata dalla contabilizzazione del soil C sequestration nella valutazione del GWP è stata osservata nell'azienda A14, appartenente all'area Nord, per entrambe le unità funzionali considerate (68% e 54% per gli indicatori riferiti rispettivamente al kg di latte normalizzato e all'ha di SAU). Segue l'azienda A8 (area Granito), con percentuali leggermente inferiori per l'unità funzionale 'kg di latte normalizzato' e 'ha di SAU' (67% e 53%, rispettivamente). La minore riduzione percentuale è stata osservata, invece, nell'azienda A16 (area Nord), con valori pari a 12% e 11% rispettivamente per kg di latte normalizzato ed ha di SAU. Escludendo l'azienda A16, le aziende A17 (Sud), A18 (Sud), A19 (Sud) e A15 (Nord) mostrano i più bassi valori di riduzione



percentuale del GWP con contabilizzazione del soil C sequestration per entrambe le unità funzionali (tra il 13% e il 20%), mentre nell'azienda A20 (Sud) si osservano bassi valori di riduzione percentuale per kg di latte normalizzato (17%) e valori decisamente più alti per ha di SAU (28%). Valori percentuali intermedi sono osservati nelle altre aziende dell'area granitica, in tutte le aziende dell'area basaltica e nell'azienda A13 (Nord), per l'unità funzionale 'kg di latte normalizzato' (tra il 56% e il 26%) e 'ha di SAU' (tra il 44% e il 19%).

Considerando l'area geografica (e non la singola azienda) come unità di analisi dei risultati della Figura 1, si osserva che le aziende dell'area granitica, complessivamente, sono quelle in cui il soil C sequestration è in grado di ridurre maggiormente i valori di GWP per kg di latte normalizzato (45%) e per ha di SAU (35%). Contrariamente, la minore riduzione percentuale del GWP indotta dalla contabilizzazione del soil C sequestration si osserva nelle aziende dell'area Sud, con valori medi pari a 17% e 18% rispettivamente per le due unità funzionali 'kg di latte normalizzato' ed 'ha di SAU'. Rispetto ai valori osservati nell'area granitica, le aziende dell'area basaltica mostrano mediamente riduzioni percentuali inferiori del GWP per kg di latte normalizzato e per ha di SAU (38% e 30%, rispettivamente). Infine, nelle aziende dell'area Nord, le riduzioni percentuali media del GWP per kg di latte normalizzato e per ha di SAU (34% e 28%, rispettivamente) sono leggermente inferiori a quelle osservate nelle aziende basaltiche ma superiori a quelle osservate nell'area Sud.

Figura 1. Emissioni positive (Global Warming Potential) e negative (Soil C sequestration) riferite al kg di latte normalizzato (a) e all'ha di SAU (b) nelle 18 aziende oggetto di analisi, espresse in kg di CO₂ equivalente (CO₂-eq). I valori percentuali indicano la riduzione dell'impronta carbonica determinata dalla contabilizzazione del sequestro del C nel suolo (rapporto Soil C sequestration / Global Warming Potential).





DISCUSSIONE

4.1- SEQUESTRO DEL C NEL SUOLO NELLE 18 AZIENDE

Le aziende più produttive, insediate principalmente nelle aree pianeggianti della Sardegna meridionale e settentrionale, complessivamente sequestrano meno C nel suolo rispetto alle aziende meno produttive delle aree collinari e montane del Centro Sardegna, a prescindere dall'unità funzionale alla quale sono attribuiti i valori di soil C sequestration. Questo risultato è confermato dalla relazione inversa significativa ($P\text{-value} < 0.01$) tra i valori di sequestro del C nel suolo, espressi per ha di SAU e per kg di latte normalizzato, e il livello produttivo medio per capo nelle diciotto aziende campionate (Figura 2). Le caratteristiche dell'area di insediamento dei diversi sistemi produttivi condizionano la loro struttura organizzativa, il livello di intensificazione/estensificazione e, di conseguenza, il livello produttivo. Nel complesso, le aziende radicate nelle aree marginali del Centro Sardegna sono caratterizzate da strutture e assetti più estensivi rispetto alle aziende insediate nelle aree più fertili. Di conseguenza, negli ordinamenti colturali delle aziende più estensive prevalgono i pascoli naturali, che hanno maggiore propensione al sequestro di C nel suolo rispetto agli erbai. Infatti, come si evince dalla Figura 3, esiste una relazione positiva significativa ($P\text{-value} < 0.001$) tra i valori di sequestro del C nel suolo (espresso per kg di latte normalizzato e per ha di SAU) e la % di pascoli naturali che occupano la SAU aziendale. Tuttavia, alcune aziende mostrano delle performance differenti rispetto a quelle genericamente discusse, e meritano di essere analizzate come singoli casi studio. L'azienda A14, nonostante appartenga al gruppo delle aziende più produttive e sia insediata su suoli sedimentari del Nord Sardegna, è l'azienda che sequestra più C per ha di SAU. Questo risultato è da attribuire all'elevata presenza di pascoli naturali (85% della SAU), tipico delle aziende semi-estensive insediate nelle aree basaltiche e granitiche del Centro Sardegna. In questo specifico caso, nonostante la fertilità dei suoli non rappresenti un fattore limitante, la struttura produttiva e la gestione aziendale più estensiva sono legate esclusivamente a scelte imprenditoriali e ideologiche dell'allevatore, agevolato anche dalla cospicua disponibilità di superficie agricola. Nonostante l'uso del suolo e l'utilizzo di input non sia spinto come avviene nella maggior parte delle aziende delle aree più produttive, viene comunque garantito un livello produttivo medio-alto grazie all'integrazione di considerevoli quantità di concentrati nella dieta del gregge. Un analogo ragionamento può essere fatto per l'azienda A13, anch'essa insediata nell'area settentrionale dell'isola: i pascoli naturali, che occupano il 50% della SAU, contribuiscono a



mantenere elevate le capacità di sequestro di C nel suolo. La struttura di questa azienda è, però, meno estensiva della precedente, e la rilevante presenza di pascolo naturale è dettata dalla marginalità del sito in cui è insediata l'azienda, che presenta aree notevolmente declivi, con ridotta profondità e roccia affiorante. L'uso del suolo è intensivizzato esclusivamente nelle aree più fertili investite a erbaio (meno declivi) e contribuisce, insieme alla rilevante quantità di sostanza secca somministrata ai capi in produzione, a mantenere buoni livelli produttivi. Le aziende A8 e A5, nonostante siano insediate rispettivamente nelle aree granitiche e basaltiche del Centro Sardegna, mostrano livelli produttivi medio alti. Sono aziende semi-estensive, caratterizzate da un moderato uso del suolo occupato prevalentemente da pascoli naturali (67% e 86% della SAU, rispettivamente) che, conseguentemente, condizionano positivamente le capacità di sequestro di C nel suolo. La buona resa lattifera dei capi in produzione è associata: i) alla buona qualità dei pascoli naturali ricchi di leguminose e al significativo utilizzo dei concentrati nell'azienda A8; ii) alla significativa produttività dei pascoli naturali favorita da pratiche di miglioramento pascolo, riconducibili principalmente alle fertilizzazioni annuali, eseguite nell'azienda A5. Infine, si evidenziano le scarse performance dell'azienda A19 (area Sud), sia in termini di produttività che di capacità di sequestro di C nel suolo. La superficie aziendale è limitata, il carico animale è elevato, il ricorso a input esterni è notevole, l'uso del suolo è particolarmente spinto: le terre sono eccessivamente sfruttate (100% erbaio), con limitate capacità di sequestro a causa delle frequenti lavorazioni. In queste condizioni, nonostante l'allevatore cerchi di incrementare la produttività aziendale acquistando mangimi dall'esterno e massimizzando l'autoproduzione di alimenti, le rese lattifere dei singoli capi si attestano su livelli medio-bassi.

4.2- SEQUESTRO DEL C NEL SUOLO NELLE AZIENDE RAGGRUPPATE PER MACRO-AREE E LIVELLO PRODUTTIVO

Come già accennato sopra, le aziende insediate nelle aree basaltiche e granitiche della Sardegna centrale sono caratterizzate, principalmente, da sistemi produttivi più estensivi rispetto alle aziende insediate nelle aree sedimentarie pianeggianti del Nord e del Sud Sardegna. Le attività agro-zootecniche sono meno intense, cioè l'utilizzo di input è ridotto e c'è una minore propensione all'intensificazione colturale a causa delle minori potenzialità produttive del suolo. Ciò comporta minori livelli produttivi delle aziende del Centro Sardegna (mediamente, 117 kg di latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹) e una

ridotta capacità di auto-provvigionamento (circa 62%) rispetto alle aziende ubicate nel Nord e Sud dell'isola (188 kg di latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹ e capacità di auto-provvigionamento pari al 74%). Tuttavia, il sequestro di C nel suolo è maggiore nel primo gruppo di aziende, ubicate nelle aree basaltiche e granitiche del Centro, sia quando questo viene riferito al kg di latte normalizzato sia quando viene riferito all'ha di SAU. Infatti, in linea di massima, la ridotta produttività corrisponde a minori quantità di latte prodotto per azienda che determina maggiori valori di C sequestrato per unità di prodotto, come conseguenza di più piccoli valori al denominatore.

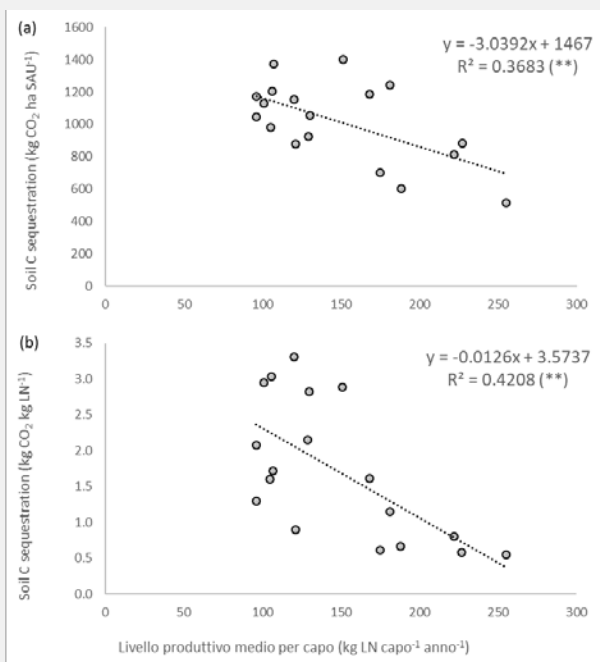


Figura 2. Relazione negativa tra i valori di sequestro del C nel suolo, espressi per ha di Superficie Agricola Utilizzata (SAU) (a) e per kg di latte normalizzato (LN) (b), e il livello di produttività media per capo nelle diciotto aziende. La significatività della relazione è indicata dagli asterischi (** = P-value < 0.01).

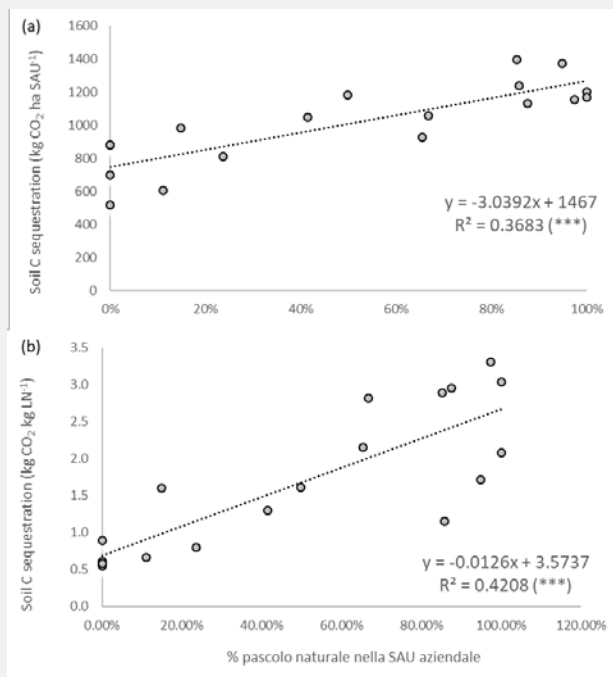


Figura 3. Relazione positiva tra i valori di sequestro del C nel suolo, espressi per ha di Superficie Agricola Utilizzata (SAU) (a) e per kg di latte normalizzato (LN) (b), e la % di pascolo naturale nella SAU aziendale delle diciotto aziende. La significatività della relazione è indicata dagli asterischi (***) = P-value < 0.001).

Tuttavia, la maggiore capacità di sequestro di C per ha di SAU è da attribuire al tipo di gestione e uso del suolo: la % della SAU destinata a pascolo naturale è, in media, significativamente maggiore nelle aziende delle aree basaltiche e granitiche del Centro Sardegna (75%) rispetto alle aziende delle aree



sedimentarie del Nord e del Sud Sardegna (21%). Viceversa, gli erbai sono prevalenti negli ordinamenti colturali delle aziende ubicate nelle aree pianeggianti e più produttive (Nord e Sud Sardegna). La maggiore presenza di pascoli naturali permanenti comporta una maggiore attitudine al sequestro del C nel suolo per ha di SAU da parte delle aziende più estensive del Centro Sardegna. La minore intensità delle lavorazioni del suolo (pascoli naturali) favorisce la conservazione della sostanza organica, mentre le lavorazioni frequenti tipiche degli erbai favoriscono i processi di mineralizzazione (Six et al., 2004; Acar et al., 2018). Inoltre, la quantità di residui colturali lasciati al suolo dal pascolo naturale è notevole, soprattutto in termini di turnover della biomassa radicale e di rizodeposizioni (Beniston et al., 2014; Lorenz and Lal, 2018).

Il raggruppamento delle aziende basato sul livello di produttività individuale (soglia pari a 130 kg di latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹) ha mostrato risultati simili soltanto in parte a quelli osservati con l'altro raggruppamento sopra descritto. Nel gruppo delle aziende più produttive (rese > 130 kg latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹) sono incluse le quattro aziende del Nord, tre aziende del Sud (esclusa l'azienda A19), un'azienda dell'area basalto (azienda A5) e un'azienda dell'area granito (azienda A8). Di conseguenza, al gruppo delle aziende meno produttive (rese < 130 L latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹) appartengono le restanti quattro aziende basaltiche, le restanti quattro aziende granitiche e l'azienda A19 (Sud Sardegna). Le aziende con livelli produttivi più bassi sequestrano maggiore C nel suolo per kg di latte normalizzato a causa delle minori quantità di latte prodotto, similmente a quanto osservato nel precedente raggruppamento (109 vs 189 kg di latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹ rispettivamente nelle aziende meno produttive e più produttive). Tuttavia, i due gruppi di aziende mostrano livelli di sequestro del C nel suolo per ha di SAU non significativamente differenti, in virtù di simili usi e gestione del suolo. Infatti, la % di SAU investita a pascolo naturale non è significativamente differente tra i due gruppi di aziende (mediamente, 51%).

4.3- CONTABILIZZAZIONE DEL SEQUESTRO DI C NEL SUOLO NELLA STIMA DEL GWP

La contabilizzazione del sequestro di C nel suolo nella valutazione dell'impronta carbonica dei sistemi produttivi oggetto di analisi ha prodotto riduzioni percentuali del GWP non trascurabili. Considerando l'intera popolazione campionata, si registra una riduzione media pari al 34% del GWP riferito al kg di



latte normalizzato e del 28% per il GWP riferito all'ha di SAU. Nello specifico, le maggiori riduzioni percentuali sono state osservate nelle aziende A14 (Nord) e A8 (Granito), e sono da attribuire alle particolarità caratterizzanti i due sistemi produttivi, che mostrano buoni livelli di resa lattifera nonostante assetti strutturali semi-estensivi e significativa presenza di pascoli naturali. Inoltre, le due aziende sono le meno impattanti in termini di GWP per kg di latte normalizzato e per ha di SAU in seguito a inclusione del soil C sequestration nella stima dell'impronta carbonica. Le buone rese lattifere determinano valori medio-bassi di GWP per kg di latte normalizzato; parallelamente, queste due aziende sequestrano più C nel suolo delle aziende con livelli produttivi medio alti, grazie alla maggiore presenza percentuale dei pascoli naturali: ciò comporta maggiori riduzioni % del GWP e minori valori di GWP per kg di latte normalizzato. Inoltre, nelle aziende A14 e A8 sono stati osservati i più bassi valori di GWP per ha di SAU con esclusione del soil C sequestration, associabile in qualche modo al basso carico animale (3.82 e 3.69, rapporto tra numero di capi totali e ha di SAU, rispettivamente nelle aziende A14 e A8): di conseguenza, gli alti valori di soil C sequestration incidono notevolmente sui bassi valori di GWP per ha di SAU. Ne consegue che anche le maggiori riduzioni % e i minori valori assoluti del GWP per ha di SAU con contabilizzazione del soil C sequestration sono osservate nelle aziende A14 e A8.

Le altre aziende che mostrano considerevoli riduzioni percentuali del GWP per kg di latte normalizzato (tra il 56% e il 26%) e per ha di SAU (tra il 44% e il 19%) con contabilizzazione del soil C sequestration sono insediate principalmente nelle aree basaltiche e granitiche dell'isola, con rese lattifere medio basse (< 130 kg di latte normalizzato capo⁻¹ anno⁻¹), sistemi di gestione tendenzialmente estensivi e rilevante presenza di pascoli naturali (> 50% della SAU). Escludendo il soil C sequestration dalla valutazione dell'impronta carbonica, queste aziende hanno complessivamente alti valori di GWP per kg di latte normalizzato, a causa delle basse rese lattifere, e bassi valori di GWP per ha di SAU, grazie principalmente alla gestione estensiva (low input) e alle ampie superfici aziendali (ha di SAU) sulle quali vengono condotte le attività produttive. Tuttavia, nel gruppo di aziende in cui sono state osservate ampie riduzioni % del GWP compaiono anche aziende con caratteristiche differenti da quelle sommariamente elencate sopra. L'azienda A13 è insediata nell'area Nord e ha rese medio alte, tuttavia la consistente presenza di superfici investite a pascolo naturale determina valori di soil C sequestration che incidono significativamente sulla riduzione % del GWP per entrambe le unità funzionali, a differenza di quello che si osserva nella maggior parte delle aziende insediate su substrato sedimentario,



caratterizzate da ridotta presenza di pascoli naturali. L'azienda A5, nonostante sia insediata nell'area basaltica, ha rese lattifere medio-alte che contribuiscono al basso valore di GWP per kg di latte normalizzato, oltre che un basso valore di GWP per ha di SAU, tipico delle aziende del Centro Sardegna. Di conseguenza, l'inclusione del soil C sequestration nella valutazione dell'impronta carbonica riduce considerevolmente il GWP per entrambe le unità funzionali, grazie agli alti livelli di sequestro favoriti dalle ampie superfici coperte da pascoli naturali (86% della SAU). L'azienda A20, oltre ad appartenere al gruppo delle aziende dell'area Sud e ad avere rese lattifere molto alte, ha l'intera SAU aziendale occupata da erbai annuali. Tuttavia, la riduzione del 28% del GWP per ha di SAU con contabilizzazione del sequestro di C nel suolo è spiegato dal fatto che il medesimo indicatore, con esclusione del soil C sequestration, è relativamente basso, grazie principalmente alla distesa superficie agricola (182 ha di SAU) in combinazione con le limitate emissioni aziendali, frutto di un efficiente sistema produttivo. Il valore di soil C sequestration per ha, nonostante sia mediamente basso, incide significativamente sul GWP, determinando la riduzione % descritta sopra. Infine, le aziende A10 e A11 appartengono al gruppo di aziende in cui sono state osservate considerevoli riduzioni % del GWP con inclusione del soil C sequestration nonostante abbiano una bassa presenza % di pascolo naturale (15% e 42% della SAU, rispettivamente); tuttavia, i valori % di riduzione del GWP sono i più bassi osservati nel gruppo di aziende in questione.

Le aziende in cui si sono osservate le più basse riduzioni % del GWP per kg di latte normalizzato (< 19%) e per ha di SAU (< 17%) con l'inclusione del soil C sequestration sono insediate nelle aree sedimentarie del Nord e del Sud Sardegna. Sono caratterizzate da alti livelli di produttività (esclusa l'azienda A19), gestione semi-intensiva e limitata presenza di pascoli naturali. In questi sistemi produttivi, la capacità di sequestro di C nel suolo è limitata, e incide relativamente poco sul totale delle emissioni aziendali, indipendentemente dall'unità funzionale considerata.

Complessivamente, questi risultati evidenziano la rilevante attitudine delle aziende insediate nelle aree più marginali del Centro Sardegna a sequestrare C nel suolo. Di conseguenza, si evidenzia l'importanza di tenere in considerazione il sequestro del C nel suolo nella valutazione complessiva dell'impronta carbonica dei sistemi ovin della Sardegna, al fine di ottenere una visione completa e bilanciata delle loro prestazioni ambientali. La minore produttività delle aziende insediate nelle aree collinari e



montuose del Centro Sardegna, caratterizzate da substrati granitici e basaltici, rispetto alle aziende site nelle aree pianeggianti più fertili del Nord e Sud dell'isola, comporta un maggior impatto per kg di latte prodotto, come dimostrato dall'analisi LCA. Tuttavia, questi sistemi produttivi più estensivi sono in grado di produrre indirettamente una molteplicità di servizi eco-sistemici di difficile quantificazione, come per l'appunto il sequestro di C nel suolo. La stima del sequestro di C e la sua inclusione nell'analisi LCA appare, quindi, cruciale e offre delle importanti opportunità di valorizzazione soprattutto per i sistemi produttivi caratterizzati da ordinamenti colturali basati, principalmente, su colture permanenti come i pascoli naturali, i pascoli artificiali e i prati-pascolo. Ovviamente, è necessario sottolineare che l'inclusione del sequestro del C nel suolo riduce l'impronta carbonica del sistema produttivo analizzato, a prescindere dalla tipologia e dalla sua struttura. È doveroso sottolineare, inoltre, che alcuni casi studio sfuggono a queste generalizzazioni. L'azienda A20 è un chiaro esempio di sistema produttivo a basso impatto, grazie ai bassi livelli di emissioni e le buone capacità di sequestro del C nel suolo, pur mantenendo discreti livelli di resa lattifera.

La stima non ha considerato il sequestro del C nel suolo derivante dalla componente arborea, presente soprattutto nelle aree basaltiche e granitiche. Infatti, le 10 aziende insediate in queste aree sono costituite da appezzamenti arborati che incidono più del 50% della SAU. Soltanto due aziende insediate nel Nord Sardegna (A13 e A14) rientrano in questo raggruppamento, mentre le restanti 6 aziende hanno una percentuale di appezzamenti arborati rispetto alla SAU inferiore al 39%. Gli alberi si comportano da serbatoio naturale di C, hanno note capacità di sequestro sia nella biomassa del soprassuolo sia nel suolo, mediante biomassa radicale e rizodeposizioni. La stima del sequestro di C derivante dalla componente arborea sarà oggetto di studi futuri, indispensabile per dettagliare meglio la capacità di sequestro del C dei sistemi produttivi analizzati e per definire più accuratamente l'impatto dell'intero comparto, sia per kg di prodotto che per ha di SAU.

CONCLUSIONI

Questo studio mette in evidenza come la stima del sequestro di C nel suolo possa essere utile nella valutazione del ciclo di vita dei sistemi produttivi misti basati sull'allevamento della pecora da latte. Fornisce elementi utili da integrare nel bilancio delle emissioni, facendo variare le performance



ambientali dei sistemi produttivi in maniera non univoca, in funzione principalmente delle caratteristiche e peculiarità del sistema analizzato.

In questo studio emerge che, in linea di massima, le aziende semi-estensive site nelle aree marginali basaltiche e granitiche della Sardegna Centrale hanno maggiori capacità di sequestro di C nel suolo per unità di prodotto (kg di latte normalizzato) e superficie (ha di SAU) rispetto alle aziende più intensive insediate su substrato sedimentario del Nord e del Sud Sardegna. Similmente, anche la riduzione % del GWP per kg di latte normalizzato e per ha di SAU con contabilizzazione del sequestro di C nel suolo è maggiore nelle aziende basaltiche e granitiche piuttosto che in quelle del Nord e del Sud dell'isola. Ciò è dovuto principalmente alla prevalente presenza dei pascoli naturali nei sistemi produttivi più estensivi che, a differenza degli erbai, hanno note capacità di sequestro di C nel suolo. Tuttavia, in questo lavoro, sono stati osservati dei particolari casi studio, in cui le notevoli capacità di sequestro del C nel suolo non sono esclusivamente vincolate alla marginalità del sito, al livello di estensificazione del sistema produttivo e alla prevalenza di pascoli naturali sulla superficie aziendale.

In conclusione, è doveroso sottolineare i limiti della metodologia utilizzata, basata su modello di stima con applicazione empirica, anche se utilizzato spesso in studi simili al nostro. Ulteriori approfondimenti e indagini saranno necessari per stimare anche la capacità di sequestro della componente arborata, non inclusa nel nostro lavoro.



BIBLIOGRAFIA

Acar M, Celik I, Günel H, 2018. Effects of long-term tillage systems on aggregate-associated organic carbon in the eastern Mediterranean region of Turkey. *Eurasian J. Soil Sci.* 7:51–58.

Arca P, Vagnoni E, Duce P, Franca A, 2021. How does soil carbon sequestration affect greenhouse gas emissions from a sheep farming system? Results of an life cycle assessment case study. *Ital. J. Agron.* doi: 10.4081/ija.2021.1789.

Arzoumanidis I, Fullana-i-Palmer P, Raggi A, Gazulla C, Raugei M, Benveniste G, Anglada M, 2014. Unresolved issues in the accounting of biogenic carbon exchanges in the wine sector. *J. Clean. Prod.* 82:16–22.

Batalla I, Knudsen MT, Mogensen L, del Hierro O, Pinto M, Hermansen JE, 2015. Carbon footprint of milk from sheep farming systems in Northern Spain including soil carbon sequestration in grasslands. *J. Clean. Prod.* 30:1–9.

Beniston JW, DuPont ST, Glover JD, Lal R, Dungait JAJ, 2014. Soil organic carbon dynamics 75 years after land-use change in perennial grassland and annual wheat agricultural systems. *Biogeochemistry* 120:37–49.

Bolinder MA, Janzen HH, Gregorich EG, Angers DA, VandenBygaart AJ, 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118:29–42.

Brandão M, i Canals LM, 2013. Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18:1243–1252.

Burle M, Mielniczuk J, Focchi S, 1997. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant Soil* 190:309–316.

C. Chocarro, J. Lloveras, R. Fanlo, 2005. Effects of winter grazing on spring production of lucerne under Mediterranean conditions. *Grass and Forage Science* 60, 146–150.

Conant, R. T., Cerri, C. E., Osborne, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2), 662-668.

Decandia M, Atzori AS, Acciaro M, Cabiddu A, Giovanetti V, Molina Alcaide E, Carro MD, Ranilla MJ, Molle G, Cannas A, 2011. Nutritional and animal factors affecting nitrogen excretion in sheep and goats. In: *Challenging strategies to promote the sheep and goat sector in the current global context. Options Méditerranéennes: Série*



A. Séminaires Méditerranéens; 99. Ranilla MJ, Carro MD, Ben Salem H, Moran d-Fehr P (eds.), Zaragoza: CIHEAM / CSIC / Universidad de León / FAO, Spain, pp 201–209.

dos Santos NZ, Dieckow J, Bayer C, Molin R, Favaretto N, Pauletti V, Piva JT, 2011. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Tillage Res.* 111:208–218.

EDA (European Dairy Association), 2018. Product Environmental Footprint Category Rules for dairy products. Available from: http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR-DairyProducts_2018-04-25_V1.pdf.

Escribano M, Elghannam A, Mesias FJ, 2020. Dairy sheep farms in semi-arid rangelands: A carbon footprint dilemma between intensification and land-based grazing. *Land use policy* 95:104600.

Escudero A, González-Arias A, del Hierro O, Pinto M, Gartzia-Bengoetxea N, 2012. Nitrogen dynamics in soil amended with manures composted in dynamic and static systems. *J. Environ. Manage.* 108:66–72.

FAO, 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). *Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership*. Rome, FAO. 170 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Francia E, N. Pecchioni, O. Li Destri Nicosia, G. Paoletta, L. Taibi, V. Franco, M. Odoarde, A.M. Stanca, G. Delogu, 2006. Dual-purpose barley and oat in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 99, 158–166.

Giambalvo D, P. Ruisi, S. Saia, G. Di Miceli, A.S. Frenda, G. Amato, 2012. Faba bean grain yield, N₂ fixation, and weed infestation in a long-term tillage experiment under rainfed Mediterranean conditions. *Plant Soil* DOI 10.1007/s11104-012-1224-5.

Gislon G, Ferrero F, Bava L, Borreani G, Dal Prà A, Pacchioli MT, Sandrucci A, Zucali M, Tabacco E, 2020. Forage systems and sustainability of milk production: feed efficiency, environmental impacts and soil carbon stocks. *J. Clean. Prod.* 260:121012.

Giunta F., R. Motzo, G. Pruneddu, 2007. Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *Europ. J. Agronomy* 27, 12–24.

Giunta F., F. Cadeddu, F. Mureddu, A. Viridis, R. Motzo, 2020. Triticale cultivar mixtures: Productivity, resource use and resource use efficiency in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy* 115, 126019.



- Gutiérrez-Peña R, Mena Y, Batalla I, Mancilla-Leytón JM, 2019. Carbon footprint of dairy goat production systems: A comparison of three contrasting grazing levels in the Sierra de Grazalema Natural Park (Southern Spain). *J. Environ. Manage.* 232:993–998.
- Hunt JR, A.D. Swan, N.A. Fettell, P.D. Breust, I.D. Menz, M.B. Peoples, J.A. Kirkegaard, 2016. Sheep grazing on crop residues do not reduce crop yields in no-till, controlled traffic farming systems in an equi-seasonal rainfall environment. *Field Crops Research* 196, 22–32.
- King AE, Blesh J, 2018. Crop rotations for increased soil carbon: perenniality as a guiding principle. *Ecol. Appl.* 28:249–261.
- Knudsen MT, Dorca-Preda T, Djomo SN, Peña N, Padel S, Smith LG, Zollitsch W, Hörtenhuber S, Hermansen JE, 2019. The importance of including soil carbon changes, ecotoxicity and biodiversity impacts in environmental life cycle assessments of organic and conventional milk in Western Europe. *J. Clean. Prod.* 215:433–443.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Available from: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>.
- Lai R, Arca P, Lagomarsino A, Cappai C, Seddaiu G, Demurtas CE, Roggero PP, 2017. Manure fertilization increases soil respiration and creates a negative carbon budget in a Mediterranean maize (*Zea mays* L.)-based cropping system. *Catena* 151:202–212.
- Levasseur A, Lesage P, Margni M, Samson R, 2013. Biogenic carbon and temporary storage addressed with dynamic life cycle assessment. *J. Ind. Ecol.* 17, 117–128.
- Lorenz K, Lal R, 2018. Carbon sequestration in grassland soils. In: *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Springer (ed.), Cham, pp 175–209.
- Martiniello P, 2007. Biochemical parameters in a Mediterranean soil as effected by wheat–forage rotation and irrigation. *Europ. J. Agronomy* 26, 198–208.
- Munoz-Romero V, L. López-Bellido, R.J. López-Bellido, 2011. Faba bean root growth in a Vertisol: Tillage effects. *Field Crops Research* 120, 338–344.



Nayak AK, Rahman MM, Naidu R, Dhal B, Swain CK, Nayak AD, Tripathi R, Shahid M, Islam MR, Pathak H, 2019. Current and emerging methodologies for estimating carbon sequestration in agricultural soils: A review. *Sci. Total Environ.* 665:890–912.

Petersen BM, Knudsen MT, Hermansen JE, Halberg N, 2013. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. *J. Clean. Prod.* 52:217–224.

Pires, J., Fernandes, A., Bernardo, A., Pires, J., & Moreira, N. (2005). Meadow management hay yields and nutritive value in the Mediterranean mountain regions of the Northeast of Portugal. *Options Méditerranéennes, Série A*, 67-73.

R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Seddaiu, G., S. Bagella, A. Pulina, C. Cappai, L. Salis, I. Rossetti, R. Lai, and P. P. Roggero. 2018. Mediterranean cork oak wooded grasslands: synergies and trade-offs between plant diversity, pasture production and soil carbon. *Agrofor. Syst.* 92:893–908. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0225-7>.

Six J, Bossuyt H, Degryzed S, Deneff K, 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79:7–31.

L. Sulas, S. Canu, L. Ledda, A.M. Carroni, M. Salis, 2016. Yield and nitrogen fixation potential from white lupine grown in rainfed Mediterranean environments. *Sci. Agric.* v.73, n.4, p.338-346.

sheep
to snip
LIFE