



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORINO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, FORESTALI E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE AGRARIE

TESI DI LAUREA

Sviluppo di un'applicazione per il calcolo
di indicatori aziendali a sostegno del piano
di concimazione

Relatore: Prof. Carlo Grignani

Correlatrice: Dott.ssa Laura Zavattaro

Candidato: Andrea Ricciardelli

Anno Accademico 2017-2018

Abstract

Una concimazione squilibrata provoca ricadute ambientali che coinvolgono sia l'atmosfera sia il sistema suolo. Al fine di supportare l'agricoltore nelle scelte per una concimazione razionale, nel corso di questo lavoro è stato sviluppato un modello di concimazione efficiente, basato su algoritmi capaci di ottimizzare il piano attuale dell'agricoltore mediante semplici operazioni di calcolo dei fabbisogni colturali. Il modello restituisce in automatico uno scenario ottimizzato del piano di concimazione per azoto, fosforo e potassio minerali, specifico per ogni coltura, epoca e modalità di distribuzione. Determina una serie di indicatori agro-ambientali che rappresentano il surplus o deficit medio aziendale, la pressione ambientale e la sostenibilità economica. I risultati ottenuti per ciascuna azienda vengono messi a confronto con altre dello stesso indirizzo produttivo. A seguito di un'intervista, si restituisce immediatamente all'agricoltore il suo status attuale, lo scenario ottimizzato e gli indicatori annessi.

Dislocate tra le province di Cuneo, Torino, Alessandria e Vercelli, le aziende oggetto del lavoro di tesi sono state 41 (3000 ha di SAU); tra queste 10 erano ad indirizzo cerealicolo e 31 erano ad indirizzo zootecnico, delle quali 21 di vacche da latte, 5 linea vacca-vitello, 3 di bovini da ingrasso e 2 di suini da ingrasso.

Per lo scenario attuale, la gestione di N, P e K attuata nelle aziende di bovini da ingrasso, nelle aziende cerealicole e nelle aziende linea-vacca vitello ha riportato dei surplus di minore consistenza: i valori medi minimi hanno riguardato le aziende di bovino da ingrasso per l'azoto (5 kg N ha^{-1}), le aziende cerealicole per il fosforo ($59 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e le aziende linea vacca-vitello per il potassio ($45 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). Al contrario, le aziende suinicole hanno mostrato i maggiori surplus, pari a 135 kg N ha^{-1} , $184 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $213 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$.

Nello scenario ottimizzato, il piano di concimazione proposto ha permesso di riportare all'equilibrio la gestione dell'azoto, tranne che per le aziende suinicole. Per quanto riguarda il fosforo ed il potassio, l'ottimizzazione ha consentito di ridurre il surplus riscontrato in precedenza, senza però portare il bilancio all'equilibrio. L'indicatore economico ha evidenziato la possibilità di risparmiare fino a 116 € ha^{-1} per le aziende suinicole con una corretta modulazione della concimazione minerale. Nello scenario ottimizzato, l'indicatore sulla lisciviazione ha evidenziato che nelle aziende di bovini da ingrasso, le più efficienti, è stato possibile raggiungere un valore di lisciviazione pari a 10 kg N ha^{-1} . La lisciviazione dei suoli delle aziende suinicole si è ridotta da 65 kg N ha^{-1} a 43 kg N ha^{-1} , mentre per le aziende con vacche da latte è stata ipotizzata una lisciviazione pari a 31 kg N ha^{-1} . Siccome l'ottimizzazione ha riguardato solo la concimazione minerale, gli effetti sulla volatilizzazione di NH_3 sono stati modesti, in quanto legati soprattutto alla gestione dell'allevamento e dei reflui. L'interesse manifestato dagli agricoltori riguardo il *software* è stato più che soddisfacente, ma non sono mancati i dubbi sollevati riguardo ai dosaggi più esigui proposti. In futuro lo sviluppo di un'applicazione utilizzabile in autonomia permetterà all'agricoltore di usufruirne direttamente, comportando benefici su scala aziendale, territoriale e ambientale.

Sommario

1.	Introduzione	1
2.	Obiettivi e struttura del lavoro.....	2
3.	Il progetto Monitro	3
4.	La concimazione	4
4.1.	Classificazione dei concimi	5
4.1.1.	I concimi minerali	5
4.1.1.1.	I concimi minerali semplici	6
4.1.1.2.	I concimi minerali composti e complessi	9
4.1.2.	I concimi organici	9
4.1.3.	I concimi a base di elementi secondari e microelementi	11
4.1.4.	Gli effluenti zootecnici	11
4.1.4.1.	Letame	12
4.1.4.2.	Liquame	13
4.1.4.3.	Pollina	14
4.1.4.4.	Digestato.....	15
4.2.	Benefici ottenuti da una bilanciata concimazione	15
4.3.	Problemi relativi ad un'errata concimazione	17
4.3.1.	Problemi relativi ad un'errata concimazione dei macronutrienti	17
4.3.2.	Problemi relativi ad un'errata concimazione dei meso e dei microelementi.....	20
4.4.	Fertilizzazione sostenibile	22
5.	Normativa di riferimento	24
6.	Il piano di concimazione	26
6.1.	Il Decreto Ministeriale 5046 del 25/02/2016	26
6.1.1.	Il piano di concimazione aziendale	26
6.1.2.	Le asportazioni colturali (Y*B).....	27
6.1.3.	Disponibilità di N derivante dagli apporti naturali (An).....	27
6.1.4.	Disponibilità di N derivante da precessioni colturali (Nc).....	28

6.1.5.	Disponibilità di N derivante dalle fertilizzazioni organiche effettuate nell'anno precedente (Nf).....	28
6.1.6.	Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza ($k_c * F_c$ e $k_o * F_o$).....	28
6.2.	Il Regolamento Regionale del 29 ottobre 2007, n. 10/R.....	29
6.2.1.	Il piano di concimazione aziendale	29
6.2.2.	Le asportazioni colturali ($Y*B$).....	30
6.2.3.	Disponibilità di N derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica (Mso)	30
6.2.4.	N derivante dagli apporti naturali (A_n).....	30
6.2.5.	Disponibilità di N derivante da precessioni colturali (N_c).....	30
6.2.6.	Disponibilità di N derivante da azotofissazione (B_{fx})	30
6.2.7.	Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza ($k_c * F_c$ e $k_o * F_o$).....	30
6.3.	Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018	31
6.3.1.	La fertilizzazione	32
6.3.2.	Piano di concimazione aziendale.....	32
6.3.3.	Fabbisogni colturali (A)	34
6.3.4.	Apporti derivanti dalla fertilità del suolo (B).....	34
6.3.5.	Immobilizzazione (H).....	35
6.3.6.	Perdite per lisciviazione (C)	35
6.3.7.	Perdite per immobilizzazione e dispersione (D).....	36
6.3.8.	Azoto da residui della coltura in precessione (E)	37
6.3.9.	Azoto da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (F).....	37
6.3.10.	Azoto da apporti naturali (G).....	37
6.3.11.	Efficienza dell'azoto, fosforo e potassio apportati con i fertilizzanti....	38
6.4.	Le Norme Tecniche di Produzione Integrata 2018 della Regione Piemonte	39
6.4.1.	Il piano di concimazione aziendale	40
6.4.2.	Fabbisogni ($Y * B$).....	40
6.4.3.	Disponibilità di N derivante da precessione colturale (N_c)	41
6.4.4.	Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza ($K_c * F_c$ e $K_o * F_o$)	41
6.5.	Il piano di concimazione secondo il metodo di Masoni <i>et al.</i> , 2017	42
6.5.1.	Fabbisogni (F_N, F_P, F_K).....	43
6.5.2.	Disponibilità di N derivante da apporti idrici (N_P).....	43

6.5.3.	Disponibilità di N, P e K derivante da precessione colturale (N_{CP} , P_{CP} , K_{CP})	43
6.5.4.	Disponibilità di N derivante dalle fertilizzazioni organiche effettuate nell'anno precedente (N_{CO})	44
6.5.5.	Disponibilità di N e P derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica (N_M , P_M)	44
6.5.6.	Perdite di N e K per lisciviazione (N_L , K_L)	45
6.5.7.	Perdite di N per denitrificazione (N_D) e per volatilizzazione (N_V)	45
6.5.8.	Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza	45
6.6.	Confronto tra i metodi, elementi di novità	46
7.	I Sistemi di Supporto alle Decisioni (SSD) in agricoltura	48
7.1.	I SSD per la gestione dei nutrienti dei fertilizzanti minerali: <i>Yara CheckIT</i>	48
7.2.	I SSD per la gestione dei nutrienti dei reflui zootecnici	49
7.2.1.	Integrated Swine Manure Management	49
7.2.2.	MANNER-NPK	50
7.2.3.	ValorE	51
8.	Materiali e metodi	53
8.1.	Raccolta dati	53
8.1.1.	Descrizione delle aziende coinvolte	53
8.1.2.	L'origine dei dati e redazione dell'intervista	53
8.2.	Sviluppo di un nuovo approccio per il piano di concimazione	54
8.3.	Voci del nuovo bilancio	54
8.3.1.	Assorbimento della coltura	54
8.3.2.	Mineralizzazione della sostanza organica	55
8.3.3.	Apporti di elementi nutritivi dai residui della precessione colturale	55
8.3.4.	Apporti elementi nutritivi dalle concimazioni organiche dell'anno precedente	55
8.3.5.	Deposizioni atmosferiche	55
8.3.6.	Azotofissazione	56
8.3.7.	Apporti	56
8.3.7.1.	Apporti organici	57
8.3.7.2.	Apporti minerali	58

8.4.	Indicatori aziendali	59
8.4.1.	Surplus (+) o deficit (-) medio aziendale	59
8.4.2.	Perdite di azoto per lisciviazione	59
8.4.3.	Indicatore economico	60
8.4.4.	Indicatori per l'emissione di ammoniaca da campo.....	61
8.5.	Proposta automatica del piano di concimazione	62
9.	Risultati e discussione.....	63
9.1.	Lo scenario attuale.....	68
9.1.1.	Il piano di concimazione secondo le strategie attuali	68
9.1.2.	Indicatore surplus (+) o deficit (-) medio aziendale	75
9.1.3.	Indicatore economico	78
9.1.4.	Indicatore sull'emissione di NH ₃	79
9.1.5.	Indicatore sulla lisciviazione	80
9.2.	Lo scenario ottimizzato	81
9.2.1.	Il piano di concimazione secondo le strategie ottimizzate.....	81
9.2.2.	Surplus (+) o deficit (-) medio aziendale	82
9.2.3.	Indicatore economico	84
9.2.4.	Indicatore sull'emissione di NH ₃	86
9.2.5.	Indicatore sulla lisciviazione	86
9.3.	Confronto tra le strategie di concimazione più comuni.....	87
9.3.1.	Confronto tra le concimazioni applicate su loiessa-mais, frumento e prato stabile per indirizzo produttivo.....	87
9.3.2.	Il ruolo dell'effluente zootecnico e del compost nelle concimazioni: il caso di cer_8 e cer_9.....	88
9.4.	Impatto del <i>software</i> sugli agricoltori	89
10.	Conclusioni.....	91
10.1.	Il piano di concimazione	91
10.2.	Gli indicatori agro-ambientali	91
10.3.	Confronto tra le strategie di concimazione attuate dai casi studio	93
10.4.	Criticità del metodo di calcolo automatico del piano di concimazione	93
10.4.1.	Eterogeneità delle aziende.....	93
10.4.2.	Modulazione del fosforo e del potassio.....	94

10.4.3. Discriminazione delle buone pratiche agricole	95
10.5. Sviluppi futuri	95
11. Bibliografia	96
12. Sitografia	105

1. Introduzione

Nel 1960 un ettaro di terreno era in grado di produrre il nutrimento necessario solamente per due persone; a partire dal 2025, in seguito al forte incremento demografico, all'industrializzazione ed alla conseguente perdita di superficie arabile, un ettaro di terreno dovrà essere in grado di produrre il cibo necessario per ben cinque persone (www.federchimica.it). Per mezzo dell'introduzione di tecniche tecnologicamente sempre più avanzate, l'intensificazione dell'agricoltura ha raddoppiato i raccolti tra il 1970 e il 2010, ma ha posto di fronte anche a gravi problemi ambientali (FAOSTAT, 2017). La domanda alimentare globale sta aumentando rapidamente, così come l'impatto dell'espansione agricola sull'ambiente (Tilman *et al.*, 2011). L'incremento dell'efficienza dell'uso del suolo e dell'impiego delle risorse è fondamentale in agricoltura, al fine di alimentare una popolazione in costante aumento e di rimanere sostenibile per le generazioni future. I fertilizzanti minerali, in particolare i fertilizzanti azotati, hanno svolto un ruolo molto importante nel far fronte all'aumento della domanda di cibo e nel salvare milioni di ettari collocati in aree marginali (Singh, 2006). Al tempo stesso, l'abuso di concimi sta portando a problemi di inquinamento sia in atmosfera sia nel suolo; di conseguenza si estendono nelle falde, portando inconvenienti, quali l'eutrofizzazione delle acque. È bene ricordare che il settore agricolo e zootecnico sono i responsabili di oltre il 90% delle emissioni di ammoniaca, la quale, oltre a provocare l'acidificazione delle piogge, è responsabile anche della produzione indiretta di particolato atmosferico.

Il consumo di fertilizzanti nel mondo sta aumentando: un recente studio, applicato su scala globale, sul *trend* di impiego di fertilizzanti ha evidenziato che la domanda di azoto, fosforo e potassio cresce ogni anno rispettivamente dell'1,4%, del 2,2% e del 2,6% (Tei *et al.*, 2018). La formulazione di un corretto piano di concimazione garantisce un guadagno sia per l'economia aziendale sia per l'ambiente.

2. Obiettivi e struttura del lavoro

L'eccesso di fertilizzazione presenta delle ricadute ambientali che coinvolgono sia l'atmosfera sia il sistema suolo. Lo scopo del presente lavoro è sviluppare, nell'ambito del progetto regionale Monitro, un modello di concimazione efficiente, basato su algoritmi automatizzati. Il coinvolgimento di aziende cerealicole e zootecniche permette di fornire da un lato un quadro generale circa il rapporto tra concimazione e azienda, nonché l'impiego di concime minerale nell'areale del Piemonte, dall'altro consente di validare il modello sviluppato e modificarlo laddove siano presenti delle inesattezze. Inoltre, sono stati ideati anche indicatori agro-ambientali volti a rappresentare l'efficienza aziendale sotto molteplici aspetti:

- surplus/deficit aziendale, mettendo in relazione gli asporti, le concimazioni e gli apporti naturali;
- pressione ambientale, fornendo indicazione circa i quantitativi di ammoniaca emessa in atmosfera e circa l'azoto perso per lisciviazione;
- sostenibilità economica, traducendo il surplus di azoto, fosforo e potassio in urea, perfosfato triplo e cloruro di potassio potenzialmente risparmiabili.

Il lavoro si articola in cinque capitoli introduttivi:

- il primo capitolo introduce il progetto a cui fa riferimento questa tesi;
- il secondo capitolo definisce il concetto di concime e concimazione, evidenziando gli aspetti benefici ottenuti da un'equilibrata concimazione e gli aspetti negativi causati da un sovradosaggio o sottodosaggio di concime;
- il secondo capitolo fornisce una panoramica del contesto normativo europeo, nazionale e regionale in cui ci troviamo;
- il terzo capitolo introduce le voci del bilancio così come sono interpretate a livello legislativo;
- il quarto capitolo è volto alla definizione del concetto di Sistema di Supporto alle Decisioni e della sua applicazione in agricoltura.

Nella parte centrale del lavoro viene descritto il metodo con cui sono stati definiti il modello del piano di concimazione e gli indicatori agro-ambientali. In seguito vengono presentati i risultati di 41 aziende come casi studio: viene analizzata la concimazione adottata e la loro efficienza ambientale ed economica. Si riportano anche le considerazioni degli agricoltori riguardo il modello ed evidenziati i punti di criticità del *software* stesso. La parte conclusiva della tesi propone delle considerazioni sulla funzionalità del modello, analizzando sia i benefici che i punti critici.

3. Il progetto Monitro

Il lavoro svolto in questa tesi si inserisce all'interno del progetto "Monitro" (Monitoraggio e Gestione dell'Azoto), frutto della collaborazione istituzionale tra la Direzione Ambiente di Regione Piemonte e il Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA) dell'Università degli Studi di Torino, in attuazione della direttiva 91/676/CEE e 260/CE. Il progetto è cominciato da gennaio 2017 e terminerà il 31/12/2018. Il progetto Monitro ha come finalità:

- la definizione di alcune strategie di monitoraggio riguardanti i quantitativi di concime minerale impiegati all'interno delle aziende, volte a stabilire le dosi impiegate su scala regionale;
- il miglioramento e l'incentivazione delle buone pratiche agricole circa la gestione dei quantitativi dei concimi, soprattutto in quelle aree in cui il carico zootecnico e l'impiego di reflui è considerevole;
- l'ottimizzazione delle pratiche agricole sugli impatti dell'azoto e del fosforo in agricoltura;
- la prevenzione della contaminazione da nutrienti, come l'azoto ed il fosforo, in ambienti idrici particolarmente sensibili, quali corsi d'acqua superficiali e sotterranei e gli ambienti idrici della Rete Natura 2000; particolare attenzione è rivolta verso le zone vulnerabili da nitrati, che rivestono un'area pari al 38% della SAU regionale.

Monitro presenta obiettivi con finalità ambientali e gestionali che si intersecano fra loro, in quanto da un lato la volontà è di incentivare le buone pratiche agricole volte ad abbattere le emissioni di ammoniaca e dei gas ad effetto serra e a limitare la lisciviazione dei nitrati; dall'altro è solo la corretta gestione della concimazione organica e minerale a favorire l'abbattimento delle emissioni. Inoltre, le corrette modalità e tempistiche di distribuzione del letame e del liquame, possono favorire la riduzione della concimazione minerale.

Per raggiungere gli obiettivi descritti precedentemente è stato necessario sviluppare su un foglio Excel, Monitro.xlsx, un piano di concimazione, basato su nuovi algoritmi, e alcuni indicatori agro-ambientali: gli indicatori ambientali sviluppati riguarderanno le emissioni sia da stalla che da campo di ammoniaca, metano, protossido di azoto e polveri sottili. Per soddisfare le esigenze del progetto, si intervisteranno molte aziende per indirizzo produttivo (cerealicole, zootecniche, frutticole, orticole e vitivinicole) fino a raggiungere un numero rappresentativo regionale. Un numero sufficiente di aziende permetterà di confrontarle per zona e per indirizzo produttivo, mettendo in risalto le peculiarità e le criticità delle concimazioni.

In una fase successiva alla conclusione del progetto, quando sarà stato raggiunto un numero rappresentativo dell'area, è obiettivo comune lo sviluppo di un *software* applicativo, strumento che l'agricoltore potrà impiegare direttamente in azienda, sotto ausilio di tecnici, al fine di ricevere informazioni utili in merito alle buone pratiche da seguire per una concimazione bilanciata e sostenibile. L'applicazione dovrebbe essere in grado di prelevare le informazioni di cui necessita direttamente dal fascicolo aziendale: l'agricoltore dovrà fornire solo alcune informazioni circa le colture in atto e le strategie di concimazione attuali. Il *software* gli restituirà una proposta ottimizzata sulla base della concimazione attuale accompagnata dagli indicatori agro-ambientali; sarà anche presente uno scenario alternativo con i relativi indicatori, laddove l'agricoltore non fosse soddisfatto della prima opzione.

4. La concimazione

Per concimazione si intende la distribuzione di concimi alle colture: essa può essere eseguita sulla parte epigea delle piante o, più comunemente, sul terreno, modificando, in questo caso, la fertilità chimica del suolo ed esaltandone la funzione nutritiva (Giardini, 2012). In primo luogo, con questa pratica agronomica si apportano gli elementi nutritivi asportati dalle colture, in modo da permettere il perenne rinnovamento del processo produttivo senza andare incontro al graduale impoverimento del terreno (Giardini, 2012). È bene sottolineare come concime e fertilizzante non siano sinonimi, in quanto il primo esprime un concetto più specifico e restrittivo rispetto al secondo. Si definisce fertilizzante qualsiasi sostanza che, per le sue peculiari caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche, fornisce elementi nutritivi alle colture, ne regola la disponibilità, stimola lo sviluppo delle piante o concorre in qualche modo a migliorare la fertilità del suolo. A seconda dell'azione prevalente sulla coltura o sul suolo, i fertilizzanti includono diverse categorie, tra cui i concimi, la cui funzione principale è fornire elementi nutritivi alle piante (Grignani, 2016). Molte ricerche hanno messo in evidenza gli effetti benefici che la concimazione minerale ed organica possono apportare al suolo, tra cui il miglioramento della struttura aggregata e della ritenzione idrica, nonché la riduzione della densità apparente (Munkholm *et al.*, 2002; Perez-de-los-Reyes *et al.*, 2011; Raboin *et al.*, 2016; Cesarano *et al.*, 2017).

Le strategie per somministrare il concime sono principalmente due: via terreno e via fogliare. La prima modalità di distribuzione citata è la più tradizionale; richiede l'impiego di macchinari per distribuire sul terreno gli elementi nutritivi di cui le colture necessitano, sotto forma di concimi per lo più granulari. A seconda della tipologia di concime impiegata si utilizza un macchinario differente: lo spandiconcime per il concime minerale, lo spandiletame per il letame e lo spandiliquame per il liquame ed il digestato. Una volta depositato il mezzo concimante sul suolo, l'acqua presente nel terreno lo discioglie per poi successivamente veicolarlo verso le radici (Giardini, 2012). A seconda dell'origine del prodotto e delle caratteristiche pedoclimatiche, il tempo necessario perché l'intero processo venga portato a termine è variabile da qualche giorno ad alcune settimane.

Una soluzione alternativa al più classico apporto di nutrienti per mezzo di spandiconcime, che tuttavia rientra nell'ambito della strategia di concimazione appena descritta, può essere la fertirrigazione. La fertirrigazione consiste nella distribuzione di elementi nutritivi per mezzo dell'acqua di irrigazione, consentendo di ampliare la finestra temporale utile per la concimazione e, quindi, di sincronizzare meglio la distribuzione degli elementi nutritivi, intervenendo con puntualità nei momenti di maggiore criticità per la coltura (Ceccon *et al.*, 2017). Un impianto di fertirrigazione ha bisogno essenzialmente di un adeguato sistema di pompaggio, filtraggio e distribuzione a seconda della qualità della fonte di approvvigionamento idrico, delle dimensioni dell'impianto, nonché della specie coltivata (Giro e Sambo, 2018). La scelta dei filtri risulta essenziale per garantire l'efficienza dell'intero sistema di fertirrigazione, evitando occlusioni degli erogatori che possano alterare la distribuzione quantitativa della soluzione nutritiva tra le varie sezioni dell'impianto (Giro e Sambo, 2018). Gli elementi nutritivi vengono disciolti in uno o più contenitori in soluzioni, le quali, durante l'irrigazione, vengono miscelate con la corretta proporzione (Giro e Sambo, 2018). La fertirrigazione permette di ridurre l'impiego di acqua e nutrienti aumentandone l'efficienza d'uso sia a livello economico sia a livello ambientale (Giro e Sambo, 2018).

Il concime fogliare è un concime adatto per l'applicazione e l'assunzione dell'elemento nutritivo a livello dell'apparato fogliare di una coltura (D. Lgs 75/2010). È un fatto ormai accertato che la pianta possa assorbire elementi nutritivi attraverso le foglie; tuttavia la concimazione fogliare non si presta bene ai fini nutrizionali, bensì può essere considerata come un intervento integrativo che permette la risoluzione di carenze nutrizionali, spesso frequenti per i microelementi. L'applicazione fogliare di fertilizzanti presenta importanti benefici per la produzione agricola, fornendo nutrienti nel momento in cui le condizioni del suolo limitano l'assorbimento delle radici; inoltre, garantiscono una maggiore efficienza applicativa, in quanto i fertilizzanti sono richiesti in quantità molto inferiori e possono fornire almeno una parte dell'azoto necessario per sostenere la crescita (Nicoulaud e Bloom, 1996). Le strategie di concimazione fogliare potrebbero garantire maggiori efficienze nell'uso dei nutrienti, riducendo al tempo stesso gli impatti ambientali e migliorando potenzialmente i benefici per la salute dei consumatori (Otalora *et al.*, 2018). Tuttavia, l'efficacia delle applicazioni fogliari dipende dalle condizioni ambientali, in quanto le piogge e le temperature eccessivamente rigide possono vanificare l'effetto dell'intervento (Del Amor e Cuadra-Crespo, 2011). È necessario inoltre porre particolare attenzione per evitare di incorrere in sovradosaggio, in quanto la severità delle bruciature fogliari crescono con l'aumentare della dose distribuita (Blandino *et al.*, 2018).

4.1. Classificazione dei concimi

Esistono differenti criteri di classificazione dei concimi a seconda dell'aspetto preso in considerazione. Ai fini della commercializzazione, i concimi si suddividono in «concimi CE» e «concimi nazionali», i cui tipi e caratteristiche sono riportati rispettivamente nel regolamento (CE) n. 2003/2003 e nel D. Lgs 75/2010 (D. Lgs 75/2010): solo i primi possono essere commercializzati in tutta l'Unione Europea (Giardini, 2012). I concimi in commercio possono contenere uno o più elementi principali della fertilità (N, P, K) oppure mesoelementi (Ca, Mg, S, Na) e/o microelementi (B, Mn, Zn, Cu, Mo, Co, Fe). Sono anche reperibili dei preparati che sono costituiti solo da uno o più elementi secondari e/o solo microelementi (Giardini, 2012). In generale i concimi sono classificati come di seguito riportato:

- concimi minerali;
- concimi organici;
- concimi organo-minerali;
- concimi a base di elementi secondari;
- concimi a base di microelementi.

4.1.1. I concimi minerali

I concimi minerali, denominati anche inorganici o chimici, sono concimi in cui gli elementi nutritivi dichiarati sono presenti sotto forma di composti minerali, ottenuti mediante estrazione, o processi fisici e chimici industriali, o processi fisici o chimici industriali (D. Lgs 75/2010). Se da un lato fornisce un apporto immediatamente disponibile per la pianta, dall'altro l'applicazione a lungo termine di concimi minerali può accelerare la mineralizzazione dell'humus e il degrado della qualità del suolo, con tutte le conseguenze negative, quali la lisciviazione dell'azoto, una maggiore disponibilità di metalli pesanti per le piante, minore energia per i microrganismi del suolo (Menšík *et al.*, 2018). Inoltre, ripetute applicazioni possono portare a declino

del carbonio organico nel suolo, nel momento in cui l'input di carbonio nel terreno derivante dalla biomassa coltivata risulta inferiore alla quantità di carbonio decomposta dai microrganismi (Jiang *et al.*, 2014). Nella fattispecie, il concime minerale azotato è considerato come uno tra i principali contributori per quanto concerne l'inquinamento delle acque, a causa dei nitrati, e l'inquinamento atmosferico, a causa degli ossidi di azoto (Tilman *et al.*, 2002). Tuttavia, la probabilità che possano essere garantite sufficienti produzioni in grado di soddisfare la domanda globale senza l'impiego dei concimi minerali appare molto ridotta, se non impossibile (Tilman *et al.*, 2002).

Si presentano in forma solida, che può essere polverulenta, cristallina o granulare oppure fluida, sotto forma di liquidi, soluzioni, sospensioni e gas (Giardini, 2012). I concimi minerali si possono suddividere a loro volta in semplici, composti e complessi.

4.1.1.1. I concimi minerali semplici

Si definiscono semplici i concimi minerali solidi o fluidi che contengono uno solo degli elementi nutritivi principali e per questo sono chiamati azotati, fosfatici o potassici. È necessario che vengano rispettati i valori di soglia minima predisposti, come riportato in Tabella 1:

Tabella 1. Titolo minimo dichiarabile per i concimi minerali semplici azotati, fosfatici e potassici (D. Lgs 75/2010)

Concime minerale semplice	Titolo minimo dichiarabile
Concimi minerali semplici azotati	Titolo N > 8%
Concimi minerali semplici fosfatici	Titolo P ₂ O ₅ > 10%
Concimi minerali semplici potassici	Titolo K ₂ O > 6%

Per quanto concerne i concimi minerali semplici azotati, a seconda della forma di azoto presente nel concime, è opportuna un'ulteriore suddivisione in:

- concimi nitrici;
- concimi ammoniacali;
- concimi nitrico-ammoniacali;
- concimi ammidici;
- concimi a lento effetto o ritardati.

I concimi nitrici, fisiologicamente basici, sono caratterizzati da un'elevata solubilità e da un rapido assorbimento da parte della pianta (Ceccon *et al.*, 2017). Per la loro pronta azione si prestano molto bene ad interventi eseguiti in copertura o quando è richiesta una risposta immediata della coltura. Presentano un'azione anti-asfissiante e anticongelante, tuttavia sono facilmente soggetti al dilavamento. Sono normalmente dotati di costo elevato e titolo basso (Giardini, 2012).

I concimi ammoniacali sono concimi la cui prontezza d'effetto è variabile, in quanto contengono azoto in forma di ione ammonio che deve subire la trasformazione a nitrato (nitrificazione) ad opera dei microrganismi del suolo, prima di poter essere assorbito dalla pianta (Ceccon *et al.*, 2017). Essendo trattenuto dai colloidali del terreno, lo ione ammonio garantisce ai concimi che lo contengono una minor mobilità nel suolo ed un minor rischio di perdita per lisciviazione (Giardini, 2012), ma, qualora non fossero prontamente interrati, sarebbero soggetti alla volatilizzazione dell'ammoniaca. Si considerano normalmente concimi da distribuire alla semina.

I concimi nitrico-ammoniacali contengono azoto in parte in forma nitrica e in parte in forma ammoniacale e, conseguentemente, presentano caratteristiche comuni ai due gruppi precedenti (Ceccon *et al.*, 2017). Con l'aumentare del titolo, questi prodotti richiedono particolare attenzione in quanto possono diventare esplosivi in miscela con olio, sostanze carbonacee ossidabili, zolfo e solfati vari (Giardini, 2012). Pertanto, i concimi CE a base di nitrato ammonico ad elevato titolo di azoto possiedono alcune peculiarità che ne garantiscano l'innocuità; nella fattispecie, i fabbricanti devono garantire che tutti i concimi a base di nitrato ammonico ad elevato titolo di azoto abbiano superato una prova di detonabilità prima della loro immissione sul mercato (Reg. CE 2003/2003).

I concimi ammidici contengono azoto in forma ammidica ($R-CO-NH_2$). Secondo il D. lgs 75/2010, l'azoto di questi concimi, pur presente sotto forma di molecola contenente carbonio, non può essere classificato come organico, in quanto il composto è comunque ottenuto per sintesi industriale (Ceccon *et al.*, 2017). All'interno di questa categoria, è presente l'urea, il principale concime minerale impiegato in Italia (Giardini, 2012).

I cosiddetti concimi a lento effetto o ritardati sono un gruppo di composti che mira a rallentare la disponibilità dell'N in modo da seguire meglio la dinamica di assorbimento delle colture e limitare le perdite di azoto. In generale, la lentezza di rilascio dell'azoto è influenzata dal pH, dal contenuto idrico e dalla temperatura del terreno ed è ottenuta attraverso diverse strategie come:

- l'aggiunta di inibitori dell'ureasi e della nitrificazione (idrochinone, benzochinone, solfato di argento), i quali si degradano nel tempo perdendo progressivamente la loro funzione inibitrice (Ceccon *et al.*, 2017);
- la protezione fisica dei granuli con particolari sostanze o membrane di polimeri che ne ritardino la solubilizzazione (zolfo, cere, vermiculite, resine) (Giardini, 2012);
- l'incremento della complessità molecolare attraverso l'impiego di prodotti ottenuti per reazione dell'urea con diverse aldeidi (urea formaldeide, isobutilendiurea, crotonilendiurea; Ceccon *et al.*, 2017).

I principali concimi minerali semplici azotati in commercio sono riportati nella Tabella 2:

Tabella 2. Principali concimi minerali azotati semplici (Ceccon *et al.*, 2017)

Classificazione	Concime	Titolo (N%)
Concimi nitrici	Nitrato di calcio	15,5
	Nitrato di magnesio	11
	Nitrato del Cile	15-16
Ammoniacali	Solfato ammonico	20-21
	Ammoniaca anidra	82
Nitro-ammoniacali	Nitrato ammonico	26-27
	Solfonitrato ammonico	25
Ammidici	Urea	46
	Calciocianamide	25

Per quanto concerne il fosforo, la pianta lo assorbe come ione $H_2PO_4^-$ (diidrogeno fosfato) e ione $H_2PO_4^{2-}$ (idrogeno fosfato), le cui concentrazioni nella soluzione circolante del terreno variano con il pH e sono comunque molto ridotte (Ceccon *et al.*, 2017): il fosforo ha un'elevata tendenza ad essere trattenuto sulle superfici adsorbenti del suolo, anche a basse concentrazioni, pertanto la sua

disponibilità è legata principalmente alle reazioni di adsorbimento e desorbimento (Battisti, 2017). I concimi minerali fosfatici semplici contengono, in quantità dichiarabile, fosforo, ma possono esser costituiti anche da elementi secondari e microelementi, ma non da quantità dichiarabili di azoto e potassio (Giardini, 2012). Per i concimi fosforici assume particolare importanza la solubilità del fosforo di cui sono caratterizzati (Ceccon *et al.*, 2017). Su questa base, i fertilizzanti fosforici possono esser classificati in:

- idrosolubili, quali i fosfati di ammonio e l'acido fosforico;
- di media solubilità, quali i superfosfati di calcio e le scorie Thomas;
- di scarsa solubilità, come i fosfati naturali.

Il titolo viene espresso come P_2O_5 e non deve esser inferiore al 10% (D. Lgs 75/2010); quasi sempre il titolo di P_2O_5 dichiarato deve esser solubile nel citrato ammonico ed una frazione dello stesso deve esserlo anche in acqua (Giardini, 2012). I principali concimi minerali semplici fosfatici sono riportati in Tabella 3:

Tabella 3. Principali concimi minerali semplici fosfatici con relativo titolo e solubilità (Ceccon *et al.*, 2017, modificato)

Concime	Titolo ($P_2O_5\%$)	Solubilità
Acido fosforico	28-54	Elevata
Perfosfato semplice	18-21	Media
Perfosfato concentrato	26-36	Media
Perfosfato triplo	44-48	Media
Fosfato precipitato bicalcico diidrato	38-40	Media
Scorie Thomas	16-18	Media
Fosforiti	27	Scarsa

Per quanto riguarda il potassio, i suoi sali sono molto diffusi in natura e tra questi, come silvite (KCl), carnallite ($KCl \cdot MgCl \cdot 6H_2O$), kainite ($4KCl \cdot 4MgSO_4 \cdot 1H_2O$), langheinite ($K_2SO_4 \cdot 4MgSO_4$) sono i più comuni ed impiegati per ricavarne concimi minerali (Giardini, 2012). La maggior parte dei fertilizzanti potassici deriva da sali potassici grezzi di depositi marini ed in parte minore dai residui degli zuccherifici (Ceccon *et al.*, 2017). I concimi minerali semplici potassici sono concimi con titolo minimo dichiarabile in K_2O solubile in acqua pari al 6% e non contengono quantità dichiarabili di N o P (D. Lgs 75/2010). I principali concimi minerali semplici potassici sono riportati nella Tabella 4:

Tabella 4. Principali concimi minerali semplici potassici con relativo titolo ed impiego (Ceccon *et al.*, 2017, modificato)

Concime	Titolo (% K_2O)	Possibile impiego
Cloruro di potassio	60	Se il cloro non costituisce un problema per la coltura (cereali, foraggere, suoli sciolti)
Solfato di potassio	50	Se il cloro costituisce un problema per la coltura
Solfato potassico e magnesiacco	10-30	Se il cloro costituisce un problema per la coltura
Sale grezzo di potassio	10-18	Se il cloro costituisce un problema per la coltura

4.1.1.2. I concimi minerali composti e complessi

Un concime minerale composto è un concime per il quale è dichiarabile il titolo di almeno due degli elementi nutritivi principali, ottenuto per via chimica o per miscelazione oppure mediante una combinazione di questi due metodi (D. lgs 75/2010). Si definisce anche come concime complesso, se ottenuto per reazione chimica, per soluzione od allo stato solido per granulazione, per il quale sia dichiarabile il titolo di almeno due degli elementi nutritivi principali: per i concimi di questo tipo allo stato solido ogni granello contiene tutti gli elementi nutritivi dichiarati (D. lgs 75/2010). La maggior parte di questi concimi si trova in forma granulare, tuttavia si stanno diffondendo anche le soluzioni e le sospensioni. In generale vengono suddivisi in:

- concimi binari, i quali sono costituiti da due degli elementi nutritivi principali, possono essere azoto-fosforici (NP), azoto-potassici (NK) e fosfo-potassici (PK);
- concimi ternari, i quali sono costituiti da tutti e tre gli elementi nutritivi principali e vengono definiti azoto-fosfo-potassici.

Il titolo dei concimi composti e complessi è contrassegnato da due o tre numeri separati da un trattino, i quali rappresentano le percentuali in peso dell'elemento nutritivo presente nel concime; per esempio, il fosfato biammonico (18-46) contiene il 18% di azoto ed il 46% di anidride fosforica (Ceccon *et al.*, 2017).

Contenendo due o più elementi nutritivi, questi concimi permettono un discreto risparmio nelle spese di distribuzione in campo e di immagazzinamento: questo è un pregio particolarmente apprezzato negli ambienti in cui tali operazioni sono più costose del normale, come in collina (Giardini, 2012). È opportuno ricordare che, salvo il fosfato biammonico, il prezzo dell'unità produttiva contenuta nei concimi composti è spesso superiore a quello dei concimi semplici. Inoltre, un altro limite è che il loro impiego è sconsigliabile in copertura, in quanto solo l'azoto, se presente, si trova nelle condizioni di espletare completamente la sua attività (Giardini, 2012).

4.1.2. I concimi organici

Un concime organico è un concime derivato da materiali organici di origine animale o vegetale, costituito da composti organici ai quali gli elementi principali della fertilità sono chimicamente legati in forma organica o comunque fanno parte integrante della matrice (D. Lgs 75/2010). Anche le biomasse di origine agricola ed i biosolidi di origine agroindustriale, civile ed industriale contenenti azoto organico in forma prevalentemente proteica, sono un'ulteriore tipologia di prodotti ricchi di azoto a lento rilascio di origine naturale (Clap *et al.*, 2007, Marzadori *et al.*, 2008).

I concimi organici si possono classificare in concimi organici azotati e concimi organici azoto-fosfatici. I concimi organici azotati presentano titoli di azoto organico variabili tra il 2 e il 10%, mentre il carbonio organico varia da valori quasi nulli a circa il 20%. Possono essere prodotti a partire da pennone, cornunghia, cuoio, pelli, crini, sangue secco, farina di carne, panelli, borlande, effluenti zootecnici quali il letame essiccato (D. Lgs 75/2010). È bene sottolineare che alcune matrici, tra cui borlanda, carniccio, sangue, si prestano a fornire anche concimi fluidi.

I concimi organici azoto-fosfatici presentano titoli di azoto organico variabili tra l'1 e il 3%, mentre il contenuto di P₂O₅ può raggiungere anche il 22%. Possono essere prodotti a partire da pollina essiccata, guano, farina di pesce, di ossa, residui della macellazione, biomasse di miceli (D. Lgs 75/2010).

Le pratiche di fertilizzazione, soprattutto quella organica, rappresentano una buona soluzione per migliorare la fertilità dei suoli, ma anche lo stoccaggio di carbonio, con un positivo effetto sulla emissione di gas serra.

Gli svantaggi legati al loro utilizzo sono, invece, i seguenti:

- risulta poco efficace il loro uso al fine di apportare sostanza organica stabile al terreno;
- il costo per unità di elemento nutritivo apportata è più elevata;
- è quasi sempre necessario un successivo aggiustamento con altri fertilizzanti.

Particolare attenzione merita il sovescio che consiste nell' interrimento di tutta la vegetazione di una coltura seminata appositamente per tale scopo. Le specie maggiormente impiegate sono il favino, il trifoglio, il lupino, la veccia e l'ultimo sfalcio di prati, segale, orzo, colza. La semina di colture erbacee e la loro successiva incorporazione nel suolo permette di apportare sostanza organica, consentendo di compensare in parte le esigenze nutritive delle piante in sostituzione dei fertilizzanti azotati e costituendo una fonte di biodiversità microbica nel suolo (Mescalchin e Zanzotti, 2018). Sono in grado di garantire un apporto di sostanza organica compreso tra 4 e 7 t ha⁻¹ di sostanza organica. Questa pratica concorre a trattenere l'acqua e i principi nutritivi, costituisce una fonte di energia per diversi gruppi di microrganismi e, nel corso della sua decomposizione, rilascia nutrienti per le piante (Mescalchin e Zanzotti, 2018). Molto spesso può essere utile associare il sovescio alle esigenze di difesa dall'erosione (*cover crops*) o per ridurre il rischio di lisciviazione di composti azotati (*catch crop*). Va inoltre ricordato che l'azoto presente nel sovescio è in forma organica e non è quindi immediatamente disponibile come quello apportato con i concimi minerali (Mescalchin e Zanzotti, 2018). Se dal punto di vista del bilancio della sostanza organica il sovescio può costituire un contributo importante, occorre aver ben presente che l'azione svolta sulla struttura e sulla stabilità degli aggregati è estremamente diversa da quella esercitata, ad esempio, dal letame. L'effetto del sovescio sulla struttura del suolo è molto evidente al termine di un ciclo autunno-primaverile, ma risulta poco duraturo: l'azione aggregante è determinata dalle sostanze formatesi dalla rapida evoluzione della biomassa vegetale e dai microrganismi che su questo substrato si sviluppano (Mescalchin e Zanzotti, 2018). Inoltre, l'indice di conversione in humus del letame varia dal 35% al 50% in peso della sostanza secca, mentre quello del sovescio, in condizioni ottimali, non supera il 15% (Mescalchin e Zanzotti, 2018).

I concimi organo-minerali

Un concime organo-minerale è un concime ottenuto per reazione o miscela di uno o più concimi organici o di una o più matrici organiche o di entrambi, con uno o più concimi minerali (D. Lgs 75/2010). Le matrici autorizzate, in aggiunta o in sostituzione di concimi organici, sono la torba acida, la torba neutra, la torba umificata, la lignite, l'ammendante vegetale semplice e l'ammendante compostato verde. La matrice organica più utilizzata nella produzione dei concimi organo-minerali è la torba, seguita da substrati organici quali cuoio, borlande, letame secco o pollina. Le matrici organiche devono essere dichiarate e, a tal fine, ciascuna matrice deve concorrere a formare il prodotto in misura non inferiore al 5% (Giardini, 2012). Nei casi in cui il prodotto sia costituito da più matrici, queste devono essere dichiarate in ordine decrescente rispetto alle quantità di ognuna presenti nel

concime (Giardini, 2012). A seconda della loro composizione, i concimi organo-minerali si distinguono in:

- concimi organo-minerali azotati;
- concimi organo-minerali azoto-fosfatici;
- concimi organo-minerali azoto-potassici;
- concimi organo-minerali azoto-fosfo-potassici.

La maggior parte dei concimi organo-minerali sono dotati di una frazione di azoto organico pari all'1% o di pochi punti percentuale superiore. I titoli finali di azoto, fosforo e potassio includono anche la componente derivante da concime minerale. I vantaggi che si ottengono attraverso l'impiego di concimi organo-minerali sono da ricercare nella migliore regolazione della disponibilità degli elementi nutritivi, dell'azoto in particolare, grazie agli effetti associati alla matrice organica. La sostanza organica che contengono può rallentare mediamente la messa a disposizione dell'azoto e migliorare, in condizioni favorevoli, la disponibilità di tutti gli elementi nutritivi (Giardini, 2012). Gli svantaggi sono rappresentati dal maggior costo del prodotto rispetto ai concimi minerali e dal fatto che se si impiega la torba come matrice organica, questa è a volte considerata come materiale non riciclabile.

4.1.3. I concimi a base di elementi secondari e microelementi

I concimi a base di elementi secondari sono prodotti naturali o sintetici che contengono uno degli elementi secondari, quali calcio, zolfo, magnesio e sodio, espressamente dichiarato. Possono contenere anche altri elementi secondari o microelementi, ma non in quantità dichiarabili degli elementi chimici principali della fertilità (Giardini, 2012). I concimi a base di microelementi sono prodotti naturali o sintetici che contengono, espressamente dichiarato uno o più microelementi, quali boro, cobalto, rame, ferro, manganese, molibdeno e zinco. Possono contenere anche altri elementi secondari, ma non in quantità dichiarabili degli elementi chimici principali della fertilità (Giardini, 2012). Nei concimi il titolo deve essere indicato e deve superare un valore minimo che varia con l'elemento considerato, il composto chimico e la formulazione.

Si interviene con concimi a base di elementi secondari o microelementi laddove si presentano segnali di carenza, come verrà descritto nei capitoli successivi.

4.1.4. Gli effluenti zootecnici

Si definiscono effluenti zootecnici le deiezioni del bestiame o una miscela di lettiera e di deiezione di bestiame, anche sottoforma di prodotto trasformato, ivi compresi i reflui provenienti da attività di piscicoltura provenienti da impianti di acqua dolce (D.M. 5046/2016). Agli effluenti zootecnici si attribuisce un complesso di azioni di carattere fisico, chimico e biologico che si manifestano sul suolo coltivato con varia intensità anche in funzione del tipo di prodotto impiegato (Giardini, 2012). Ad esempio, i trattamenti prolungati di letame migliorano significativamente la stabilità degli aggregati del terreno grazie all'incremento della frazione dei macro-aggregati (>2 mm) (He *et al.*, 2018). Inoltre, la loro azione comporta normalmente un aumento del pH del suolo. L'applicazione di effluenti zootecnici può fornire sostanziali quantità di carbonio, azoto ed altri nutrienti ai terreni (He *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016): quindi queste pratiche sono ampiamente raccomandate per mantenere o migliorare gli stock carbonio organico nel suolo (Watts *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2014).

La concimazione organica è di grande interesse, in quanto i reflui potrebbero integrare o sostituire i fertilizzanti chimici: tuttavia, prima del loro impiego, è necessario pretrattarli attraverso alcune strategie, come la maturazione del letame o lo stoccaggio in vasca del liquame, al fine di eliminare i contaminanti organici degradabili, i metalli pesanti e diversi microrganismi patogeni (Limam *et al.*, 2018). La velocità con cui i diversi prodotti rilasciano l'azoto organico dipende non solo dalle caratteristiche fisico-chimiche dei prodotti stessi, ma anche dall'intensità dell'attività dei microrganismi del terreno che traggono l'energia dai processi di mineralizzazione della sostanza organica (Ramieri *et al.*, 2004, Cavani *et al.*, 2008, Grigatti *et al.*, 2011). I processi chimici e microbiologici, a loro volta, sono fortemente influenzati dalle condizioni climatiche, come temperatura ed umidità, e di reazione del terreno che individua valori ottimali verso la neutralità e la basicità, in quanto i batteri prediligono ambienti non acidi (Grignani, 2016).

È importante sottolineare che buona parte tra i reflui zootecnici è consentita in agricoltura biologica, come riportato nella Tabella 1 dell'allegato 13 del D. Lgs. 75/2010. (Grignani, 2016).

Di seguito sono trattati in modo più specifico i reflui zootecnici maggiormente impiegati in agricoltura di pieno campo o che presentano problemi agronomici e ambientali particolari.

4.1.4.1. Letame

Il letame è tradizionalmente riconosciuto come un fertilizzante prezioso e, fino all'inizio del XX secolo, l'applicazione di questo refluo è stato l'unico metodo per arricchire il terreno. Il letame è costituito da effluenti di allevamento palabili, provenienti da allevamenti che impiegano la lettiera (D.M. 7 aprile 2006). Sono assimilati ai letami, solo se provenienti dall'attività di allevamento, anche:

- le lettiere esauste di allevamenti avicunicoli;
- le deiezioni di avicunicoli anche non mescolate a lettiera rese palabili da processi di disidratazione naturali o artificiali che hanno luogo sia all'interno, sia all'esterno dei ricoveri;
- le frazioni palabili, da destinare all'utilizzazione agronomica, risultanti da trattamenti di effluenti zootecnici.

Si tratta di un materiale di consistenza eterogenea, di composizione incostante, con caratteristiche variabili in funzione del tipo e della quantità di lettiera, del tipo di animale che l'ha prodotto, della tecnica di produzione e di conservazione (Giardini, 2012). In generale la quantità e le caratteristiche del letame dipendono anche dai sistemi di allevamento, a seconda se si adotta la stabulazione libera, in cui gli animali sono liberi di cercare il cibo, o la stabulazione fissa, in cui gli animali non sono liberi di muoversi per un periodo variabile da alcuni mesi fino all'anno intero (Sommer *et al.*, 2013). L'alimentazione gioca un ruolo essenziale nel determinare le peculiarità del prodotto ed un ulteriore fattore di variazione è il processo di maturazione a cui è sottoposto su una platea impermeabilizzata. La maturazione del letame è idealmente un processo che mira a favorire il potere umigeno e quindi ammendante del refluo zootecnico, a limitare la vitalità dei semi delle infestanti e la carica patogena, ad eliminare i processi putrefattivi ed a ridurre la formazione di cattivi odori, rendere più disponibili per le colture gli elementi nutritivi presenti nel refluo. La stabilizzazione della sostanza organica durante la maturazione fa sì che, quando questo è applicato al terreno, la mineralizzazione sia lenta e prolungata (Ceccon *et al.*, 2017).

Al fine di fornire nutrienti alle colture, l'impiego di letame è considerato la migliore soluzione per concludere il ciclo dei nutrienti e per ridurre l'uso di fertilizzanti minerali (Peterson *et al.*, 2007, Sommer *et al.*, 2013). L'applicazione di questo refluo è una pratica agricola tradizionale altamente raccomandata per terreni con una fertilità relativamente bassa (Cheng *et al.*, 2019), infatti è stata riconosciuta come una strategia fondamentale per migliorare gli stock di carbonio organico del suolo. Tuttavia, l'entità dell'impatto dell'applicazione del letame sulle variazioni di stock di carbonio organico rispetto ai concimi minerali convenzionali deve ancora essere valutata nel dettaglio (Ren *et al.*, 2018). L'impiego di questo fertilizzante deve esser inteso come una strategia redditizia e rispettosa dell'ambiente, che consente di mantenere o migliorare la fertilità del suolo e la produttività delle colture (Ahmad *et al.*, 2007, Leite *et al.*, 2010). Solo se ben gestito, può esser considerata come parte di una strategia sostenibile per garantire la sicurezza alimentare globale (Ren *et al.*, 2018), in quanto è bene ricordare che è un'importante fonte di tutti e tre i principali gas serra: anidride carbonica, metano e protossido di azoto (Karmakar *et al.*, 2010).

Al letame si riconosce un prevalente effetto ammendante, mentre i suoi effetti come concime sono sempre da valutare su tempi lunghi. Infatti, solo, il 10% dell'azoto apportato è in forma solubile, quasi unicamente sotto forma ammoniacale, poiché l'azoto nitrico è sempre poco presente, mentre la frazione rimanente è a lenta degradazione.

Le principali caratteristiche chimiche del letame prodotto dalle principali specie sono riassunte nella Tabella 5:

Tabella 5. Composizione chimica del letame prodotto da bovini, ovini e bufalini (Ceccon *et al.*, 2017)

Fertilizzante	Specie	Sostanza secca (% t.q.)	N (kg t ⁻¹ t.q.)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹ t.q.)	K ₂ O (kg t ⁻¹ t.q.)
Letame	Bovini	20-30,5	3-7	0,4-1,7	3,3-8,3
	Ovini	22-40	6-11	0,7-1,3	12-18
	Bufalini	20-40	2-4	0,2-0,9	3,3-6,6

4.1.4.2. Liquame

In agricoltura il liquame è impiegato su larga scala in Europa. Il liquame è un concime liquido ottenuto dallo stoccaggio anaerobico in vasca per almeno tre mesi delle sole deiezioni degli animali allevati in stalla senza lettiera e delle relative acque di lavaggio (Ceccon *et al.*, 2017). In base ai sistemi di pulizia della stalla e alle condizioni meteorologiche, nel liquame sono presenti quantità variabili di acqua: il suo contenuto di sostanza secca è sempre inferiore a quello del letame e risulta compreso tra l'1% in autunno-inverno ed il 16% in primavera-estate (Ceccon *et al.*, 2017). Così come per il letame, anche la qualità e composizione del liquame dipende molto da una moltitudine di fattori, quali la specie animale, la struttura dell'allevamento, la quantità di acqua di lavaggio impiegata nell'allevamento in rapporto al tipo di stabulazione e alle strutture aziendali, l'eventuale miscelazione del refluo anche con acqua piovana. Gli elementi nutritivi contenuti, compresi numerosi microelementi, si rendono disponibili all'assorbimento da parte dei vegetali più velocemente di quanto avviene per il letame (Giardini, 2012). I principali motivi sono due: in primo luogo, una parte degli elementi nutritivi è già presente sotto forma minerale e parzialmente in soluzione; in secondo luogo, il rapporto C:N piuttosto ridotto della sostanza organica, a causa della mancanza delle paglie, ne favorisce

la mineralizzazione. Tutto ciò conferisce ai liquami una prontezza e una durata di azione intermedia fra quella del letame e quella dei concimi organici (Giardini, 2012). In condizioni climatiche particolarmente calde, a causa della rapida degradazione della sostanza organica, il liquame può fornire elementi tossici che possono causare gravi danni all'ambiente (Melo *et al.*, 2018).

Tuttavia, sebbene sia un'alternativa per questi che altrimenti andrebbero considerati come rifiuti, il loro uso come concime richiede cautela nella gestione, soprattutto a causa di problemi ambientali. Le principali preoccupazioni ambientali riguardanti l'impiego del liquame includono in particolare le perdite di azoto attraverso la lisciviazione di nitrati e la volatilizzazione dell'ammoniaca e del protossido di azoto (Meade *et al.*, 2011). Strategie come l'incorporazione del liquame nel terreno, oltre a frazionare la dose raccomandata, possono determinare una significativa riduzione della volatilizzazione di NH₃ (Dell *et al.*, 2012). Recentemente, sono stati integrati durante la distribuzione del refluo alcuni inibitori della nitrificazione, i quali possono agire nella riduzione delle emissioni di N₂O (Zaman *et al.*, 2009).

Le principali caratteristiche chimiche del liquame prodotto dalle principali specie sono riassunte nella Tabella 6:

Tabella 6. Composizione chimica del liquame prodotto da bovini, suini e bufalini (Ceccon *et al.*, 2017)

Fertilizzante	Specie	Sostanza secca (% t.q.)	N (kg t ⁻¹ t.q.)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹ t.q.)	K ₂ O (kg t ⁻¹ t.q.)
Liquame	Bovini da latte	10-16	3,9-6,3	1,0-1,6	3,2-5,2
	Bovini da carne	7-10	3,2-4,5	1,0-1,5	2,4-3,9
	Suini	1,5-6	1,5-5,0	0,5-2,0	1,0-3,1
	Bufalini	20	1-3	0,3-0,9	1,6-4,1

4.1.4.3. Pollina

La pollina è un effluente di allevamento prodotta dalle aziende zootecniche avicole e qui sottoposta a varie modalità di stoccaggio. La composizione fisico-chimica del refluo varia a seconda se si allevano ovaiole o polli da carne. Per gli allevamenti di ovaiole in gabbia, in cui non si fa ricorso a lettiera, la pollina ottenuta possiede circa l'80% di umidità; invece per gli allevamenti di polli da carne, i quali vengono allevati su lettiera, la pollina possiede circa il 30-40% di umidità (Giardini, 2012). La composizione chimico-fisica della pollina può subire notevoli oscillazioni dipendenti dal tipo di animale, dalla dieta adottata, dal locale di allevamento, dalla durata di conservazione, dall'impiego o meno della lettiera (Giardini, 2012). Il ridotto rapporto C:N e la forma di azoto rendono la pollina un fertilizzante ad azione relativamente rapida.

La pollina gestita impropriamente può comportare conseguenze fastidiose per l'ambiente, provocando soprattutto danni per quanto concerne la lisciviazione. Pertanto, sono necessarie azione specifiche per il trattamento e lo smaltimento al fine di gestire l'enorme quantità di reflui prodotti. (Yetilmezsoy et Sapci-Zengin, 2009).

Le principali caratteristiche chimiche della pollina sono riportate nella Tabella 7:

Tabella 7. Composizione chimica della pollina (Giardini, 2012)

Fertilizzante	Specie	Sostanza secca (% t.q.)	N (kg t ⁻¹ t.q.)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹ t.q.)	K ₂ O (kg t ⁻¹ t.q.)
Pollina	Ovaiole	20	1,1	0,6	0,4
	Broilers	65	3	2	1,6

4.1.4.4. Digestato

I sistemi intensivi agroindustriali generano grandi volumi di rifiuti organici in aree relativamente ridotte che, se non gestiti correttamente, conducono ad un considerevole rischio ambientale (locoli *et al.*, 2019, Kunz *et al.*, 2009), potenzialmente causa di contaminazione del suolo, dell'acqua e dell'aria attraverso la lisciviazione di sostanze nutritive e l'emissione di gas serra (locoli *et al.*, 2019, Gómez-Brandón *et al.*, 2013). Negli ultimi anni, una maggiore attenzione alla catena di gestione dei rifiuti e al controllo del consumo energetico ha promosso l'uso di fonti rinnovabili per la produzione di energia. Come indicato dalla direttiva europea 2009/28/CE, la digestione anaerobica rappresenta un'importante strategia al fine di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra, di conformarsi al protocollo di Kyoto ed alla successiva legislazione internazionale sulle emissioni (Grigatti *et al.*, 2011).

Gli effluenti zootecnici possono essere facilmente trattati mediante digestione anaerobica per la produzione di biogas, poiché forniscono un adeguato substrato organico. Contengono i gruppi microbici coinvolti nel processo e generalmente possiedono un'elevata capacità tampone. D'altra parte, la biomassa vegetale, tra cui il mais trinciato ed i rifiuti orto-frutticoli, sono caratterizzati da una discreta concentrazione di carboidrati fermentescibili e da una ridotta capacità tampone: quindi, generalmente, non possono essere sottoposti a digestione anaerobica, se non in presenza di ulteriori matrici più stabili (locoli *et al.*, 2019). Attraverso la digestione anaerobica, gli effluenti zootecnici possono essere efficacemente convertiti in due prodotti di valore, vale a dire il biogas e il digestato. Il biogas, come energia rinnovabile, può essere sfruttato per la fornitura di riscaldamento ed elettricità e come carburante per i veicoli (Zaks *et al.*, 2011). Il digestato può essere impiegato come fertilizzante organico per attività agronomiche a causa del suo elevato contenuto nutritivo (Nkoa, 2013). Il processo di digestione anaerobica non modifica il contenuto degli elementi nutritivi, bensì altera la ripartizione tra le diverse forme chimiche, attribuendo, in tal senso, al digestato caratteristiche tali da avvicinarlo maggiormente al liquame rispetto al letame: ad esempio, nel caso dell'azoto, incrementa la frazione ammoniacale a discapito di quella organica. La variabilità compositiva dei digestati è influenzata dal tipo di liquame e dalla biomassa vegetale (*energy crops*) che molto sovente viene integrata in co-digestione.

4.2. Benefici ottenuti da una bilanciata concimazione

Al giorno d'oggi, applicare il corretto quantitativo di concime risulta essere di importanza primaria al fine di garantire il doveroso rispetto nei confronti dell'ambiente e dell'agricoltore stesso. La produzione efficiente e responsabile, la distribuzione ed il consapevole uso dei nutrienti vegetali svolgono un ruolo vitale nel raggiungimento della sicurezza alimentare globale e dello sviluppo sostenibile (www.fertilizer.org). Pertanto, appare essenziale individuare la dose ottimale di concimazione, la quale può essere interpretata secondo diversi aspetti. Dal punto di vista agronomico, la dose ottimale di concime è quella che permette di raggiungere il miglior risultato tecnico per quanto riguarda la quantità e qualità del prodotto e la fertilità del terreno. Dal punto di vista economico, la dose ottimale è quella che

massimizza il reddito. Dal punto di vista ambientale, la dose ottimale è quella che minimizza le alterazioni indotte dall'agricoltura (Grignani *et al.*, 2003). Di fatto i tre concetti non possono coincidere, ma un'agricoltura attenta e razionale può permettere il raggiungimento di un soddisfacente compromesso (Grignani *et al.*, 2003). Come si vedrà nei capitoli successivi, lo strumento fondamentale per raggiungere tale obiettivo è il calcolo del bilancio degli elementi nutritivi e la conseguente redazione del piano di concimazione (Grignani *et al.*, 2003).

Una bilanciata concimazione può favorire il raggiungimento di un equilibrio all'interno del sistema suolo da un punto di vista fisico, chimico e biologico. Dal punto di vista ambientale, può anche incrementare il sequestro di carbonio, il quale dipende dalla relazione tra gli input di carbonio, sotto forma di residui colturali e fertilizzanti organici, e la velocità di degradazione del carbonio nel suolo (Cooper *et al.*, 2011). Input regolari di residui, compost o letame possono aumentare il carbonio organico del suolo, fino a raggiungere un livello di equilibrio in cui input e processi di decomposizione si controbilanciano (Li *et al.*, 2018). Questo livello di equilibrio è anche influenzato dal modo in cui questi apporti vengono convertiti in carbonio stabile nel terreno da parte di comunità microbiche (Kallenbach *et al.*, 2016). I residui delle colture possono essere relativamente labili e non aumentare i livelli di carbonio stabile nel terreno, mentre materiali come il biochar sono recalcitranti e possono avere un'emivita molto più lunga nel suolo (Li *et al.*, 2018 e Steinbeiss *et al.*, 2009).

È necessario bilanciare anche i meso e microelementi, i quali, se dosati correttamente, possono fornire un contributo essenziale per la crescita delle colture. Il calcio è costituente della parete cellulare, contribuendo quindi a fornire resistenza ai tessuti. Lo zolfo è un altro fondamentale costituente cellulare, partecipando anch'esso alla formazione di numerosi aminoacidi ed esercitando quindi un ruolo parallelo a quello dell'azoto. Risulta esser importante nella nutrizione del frumento, in particolare del frumento di forza e panificabile superiore: nel glutine sono presenti molti aminoacidi solforati, quindi deve essere garantito l'armonico assorbimento di azoto e zolfo. Il ferro ed il magnesio sono due elementi che costituiscono la clorofilla, fondamentali pertanto durante i processi fotosintetici (<http://www.kali-gmbh.com>). Lo zinco è un micronutriente essenziale per il metabolismo, lo sviluppo e la produttività delle piante. Lo zinco svolge un ruolo vitale nel processo cellulare e nella sintesi delle proteine (Kathun *et al.*, 2018). Il coinvolgimento di boro nella crescita e nello sviluppo delle piante è fondamentale, in quanto è in grado di incrementare la fertilità e la successiva allegazione dei frutti di diversi cereali e leguminose; inoltre, influenza la disponibilità e l'assorbimento di altri nutrienti vegetali dal suolo, come l'azoto, il fosforo, il potassio, lo zinco, il ferro ed il rame (Ahmed *et al.*, 2011).

Il corretto impiego dei fertilizzanti rappresenta un elemento essenziale per garantire una valida produzione ed un prodotto di elevata qualità (Tei *et al.*, 2017). Infatti, la fertilizzazione può determinare effetti sensibili sulle componenti della qualità che vengono direttamente percepite dall'agricoltore e dal consumatore, quali la dimensione dei frutti, la loro omogeneità o il colore (Grignani, 2016). Benché l'equilibrio tra i diversi elementi nutritivi sia essenziale, è interessante osservare che queste caratteristiche qualitative, importanti per quasi tutte le specie coltivate, possono essere ricercate puntando su elementi nutritivi diversi a seconda delle colture: ad esempio, nei cereali prevale l'interesse per gli apporti azotati, mentre nelle colture frutticole è spesso il potassio a svolgere un ruolo da protagonista (Grignani, 2016). Non solo la dose, ma anche l'epoca di intervento può essere

determinante per la qualità e la resa produttiva. Nel caso del frumento di forza, la disponibilità di azoto tra la fioritura e la fine del processo di maturazione è il principale requisito agronomico per favorire e stabilizzare l'accumulo di proteine. Un'opportuna concimazione azotata tardiva pari a 30 kg N ha⁻¹, effettuata dopo lo stadio fenologico di botticella, influenza in modo marcato gli aspetti qualitativi (Blandino *et al.*, 2018). L'applicazione degli interventi di concimazione tardivi non è collegato ad un effetto produttivo, ma influenza solo i tratti qualitativi: nella fattispecie, all'interno dei concimi azotati più convenzionali, il nitrato ammonico garantisce un accumulo proteico nella granella ed il raggiungimento di più forti parametri alveografici rispetto all'urea (Blandino *et al.*, 2018). Quindi, oltre alla scelta varietale, anche la gestione della concimazione azotata, intesa come dose distribuita e tempi di intervento, svolge un ruolo indispensabile (Blandino *et al.*, 2018). Per quanto riguarda il mais, la concimazione fosfo-azotata localizzata alla semina, pratica diffusa negli areali maidicoli, ha come primo obiettivo quello di favorire l'assorbimento dell'azoto e del fosforo nelle prime fasi vegetative della coltura, incrementando così l'*early vigor*, ovvero il vigore di partenza (Blandino e Testa, 2015). Secondo recenti studi (Blandino *et al.*, 2011), il miglioramento del vigore di partenza consente alla coltura di superare più rapidamente il periodo critico dell'insediamento e di ottenere un significativo anticipo della fioritura con conseguenti vantaggi dal punto di vista sia quantitativo sia qualitativo.

Quindi, la fertilizzazione non è volta solo a massimizzare la produzione o ad equilibrare il flusso di elementi nutritivi nel suolo, ma influenza la qualità delle colture, esaltandola o mortificandola, con ripercussioni spesso importanti sul prezzo dei prodotti e sulle loro caratteristiche nutrizionali e sanitarie (Grignani, 2016).

4.3. Problemi relativi ad un'errata concimazione

Per ottenere un'equilibrata concimazione, occorre ricorrere alla redazione di un piano di concimazione, come si vedrà in seguito. In caso contrario si può incorrere in sovradosaggi o sottodosaggi che possono condurre rispettivamente ad intossicazioni e carenze. Se non gestito in maniera corretta dagli agricoltori, il ricorso ai fertilizzanti determina effetti negativi sull'ambiente, quali la salinizzazione dei suoli, la contaminazione delle acque da parte degli elementi più lisciviabili e l'eutrofizzazione dei corpi idrici superficiali, perdite sotto forma di gas e perdite economiche (Muller *et al.*, 2017).

4.3.1. Problemi relativi ad un'errata concimazione dei macronutrienti

Nello specifico, l'uso improprio di concimi azotati, determinato da un'elevata frequenza dei passaggi, dalla fonte fertilizzante e dal metodo e dai tempi di applicazione errati, ha portato all'inquinamento dell'aria e dell'acqua ed a ingenti perdite economiche (Singh, 2006). Inoltre, crea problemi anche a livello colturale, in quanto l'eccesso di azoto può procurare:

- squilibri di crescita a causa dell'eccessivo vigore;
- rischi di allettamento a causa dello scarso sviluppo dei tessuti di sostegno rispetto al peso della pianta Figura 1;
- consumo idrico eccessivo;
- maggiore sensibilità agli attacchi fungini e parassitari;
- produzione di frutti eccessivamente acquosi;
- ritardo nella maturazione.



Figura 1. Frumento allettato causato da eccesso di azoto (www.merateonline.it)

D'altro canto, la carenza di azoto (Figura 2) ritarda la crescita e influenza la pigmentazione fogliare dell'intera pianta: le colture mostrano una colorazione dal verde chiaro al giallo-verde (Rustioni *et al.*, 2018). La clorosi comincia a manifestarsi sulle punte e lungo le nervature delle foglie: si rende visibile prima nelle foglie basali e pertanto più vecchie, in quanto l'azoto viene mobilizzato nella pianta e trasportato nei centri di crescita (Benton Jones, 1997). Le piante che sono carenti di azoto presentano tipicamente un aspetto rigido a livello fogliare (www.kali-gmbh.com). Le colture cresciute in carenza di azoto matureranno prima con un raccolto e una qualità estremamente ridotti (Benton Jones, 1997).



Figura 2. Carenza di azoto su frumento (A), mais (B) e colza (C) (<http://www.kali-gmbh.com>)

Nel lungo periodo, i suoli soggetti a continui apporti fosfatici attraverso i fertilizzanti minerali e organici presentano un accumulo di fosforo nella forma organica e inorganica, con conseguente trasferimento del fosforo nei corpi idrici in seguito a ruscellamento e lisciviazione (Battisti, 2017, Borda *et al.*, 2011). Il fosforo perso attraverso il ruscellamento è per il 90 % in forma particolata ($> 0,45 \mu\text{m}$), adsorbito sulle particelle più fini del suolo (Celi e Bonifacio, 2016). I suoli argillosi e limosi sono infatti maggiormente soggetti alla perdita di fosforo particolato per erosione (Schoumans *et al.*, 2014). Nonostante la forma particolata rappresenti la principale forma con cui viene perso il fosforo dai suoli coltivati, può essere perso anche nella forma solubile ($< 0,45 \mu\text{m}$) in seguito a lisciviazione, in particolare nei suoli sabbiosi e ben drenati (Borda *et al.*, 2011; Celi e Bonifacio, 2016). Per quanto concerne un suo eccesso nel suolo, nella pianta generalmente non genera problemi alla coltura in sé, ma può portare ad un minore assorbimento di alcuni micronutrienti, quali zinco,

rame e ferro (Amery e Schoumans, 2014; Celi e Bonifacio, 2016). A differenza dell'eccesso di azoto, che causa alcuni squilibri di crescita nella pianta, l'eccesso di fosforo non determina effetti negativi sull'aspetto quanti-qualitativo della produzione (Reijneveld *et al.*, 2010). Un eccesso di questo macronutriente non provoca tanto danni diretti alle piante, quanto indiretti. Il fosforo è in grado di interagire con molti altri nutrienti come ad esempio il ferro, rame, azoto e boro: un'eccessiva concimazione fosfatica può causare carenze indotte di questi nutrienti. Espone, inoltre, l'ambiente agli effetti negativi conseguenti alle perdite di questo elemento. La carenza si manifesta con una diminuzione del rapporto germogli/radici e con cambiamenti di colore delle foglie: in particolare, quelle meno giovani assumono una colorazione verde scuro-bluastro, come visibile nella Figura 3, con successivi arrossamenti e necrosi delle zone marginali (Battisti, 2017, Celi e Bonifacio, 2016). A livello macroscopico, una pianta cresciuta in carenza di fosforo presenta fenomeni di nanismo, ritardo vegetativo e stentata formazione dei semi (Giardini, 2012).



Figura 3. Carenza di fosforo su frumento (A) e su mais (B) (<https://www.alamy.it>)

Le piante richiedono elevati quantitativi di potassio, tuttavia un eventuale eccesso non provoca la comparsa di sintomi, bensì può causare una carenza di magnesio e calcio (Benton Jones, 1997). Tuttavia, in condizione di eccesso, è necessario considerare l'impatto che la lisciviazione di potassio può provocare sul suolo: si valutano in funzione del drenaggio o della sua tessitura, soprattutto in relazione al suo contenuto di argilla. Nel momento in cui il quantitativo di potassio è scarso o vengono adottati particolari pratiche, quali il *minimum tillage* e il *no tillage* (Giardini, 2012), si presentano sintomi di carenza caratteristici (Figura 4) (Ciuffreda, 2017). Si verifica una crescita ritardata della coltura e l'intera pianta appare debole e avvizzita con le foglie che rimangono di dimensioni ridotte. A partire dal margine, le foglie diventano verdi brillante (<http://www.kali-gmbh.com>). Successivamente, si manifestano lungo i margini fogliari alcune bruciature (Benton Jones, 1997). Una carenza di potassio si ripercuote sulla quantità e qualità dei frutti.



Figura 4. Carenza di potassio su colza (A) e mais (B) (<http://www.kali-gmbh.com>)

4.3.2. Problemi relativi ad un'errata concimazione dei meso e dei microelementi

Tutti gli elementi secondari ed i microelementi svolgono un ruolo essenziale per consentire la vita alla coltura: partecipano alla sintesi degli enzimi, alle reazioni di ossidoriduzione, ai processi fotosintetici ed interagiscono con gli ormoni come le auxine e citochinine, stimolandoli o inibendoli (<http://www.kali-gmbh.com>). I fenomeni di intossicazione provocati dall'eccessiva presenza di meso e micronutrienti sono strettamente legati al pH del terreno, in quanto la disponibilità soprattutto dei metalli pesanti è massima nel momento in cui il suolo è acido. Nello specifico, un eccesso di calcio non è tossico per la pianta in sé, ma limita l'assorbimento di magnesio e potassio. Il discorso è analogo per il magnesio, in quanto un suo sovradosaggio ostacola il calcio e il potassio, non manifestando alcun sintomo sulla pianta (Benton Jones, 1997). Invece lo smisurato impiego di zolfo può portare alla senescenza anticipate delle foglie. L'eccesso di zinco può essere tossico nelle piante nonostante i livelli di tolleranza siano generalmente elevati. La tossicità dello zinco si traduce in inibizione dello sviluppo delle radici, clorosi sulle foglie più giovani e carenza di ferro indotta (<http://www.kali-gmbh.com>). La tossicità da eccesso di manganese si presenta su terreni acidi, in quanto in queste condizioni le soluzioni del suolo contengono principalmente ioni Mn^{2+} che possono essere facilmente assorbiti. Le foglie più vecchie, le basi fogliari e gli steli mostrano macchie bruno-nere, come conseguenza dei depositi di MnO_2 ed in una fase successiva mostrano margini clorotici. Si può verificare anche una carenza indotta di ferro, magnesio e calcio. Il ferro si può accumulare nella pianta fino a raggiungere concentrazione di alcune centinaia di ppm senza manifestare sintomi di tossicità. Una volta superato il livello di tossicità, non ancora ben definito, apparirà sulle foglie una bronzatura con piccole macchie marroni (Benton Jones, 1997).

Appare molto complicato interpretare le carenze, in quanto i sintomi sono incerti e spesso associati alla compresenza di situazioni temporanee, legate più a condizioni ambientali che ad effettivi squilibri nutrizionali. Si distinguono le carenze assolute o primarie, in cui il suolo è effettivamente povero dell'elemento di cui la pianta ha bisogno, e le carenze condizionate o indirette, in cui l'elemento in questione è presente nel suolo, ma non è disponibile per la pianta per fenomeni di antagonismo o per squilibri chimici. Molti cereali, tra cui il mais, sono estremamente sensibili alla carenza di micronutrienti, causando la comparsa di diversi sintomi (Grujicic *et al.*, 2017). Come descritti in Figura 5, i principali sintomi che compaiono sui cereali sono rappresentati da variazioni cromatiche, quali ingiallimenti ed imbrunimenti, nonché una crescita più stentata.

Nello specifico, gli apici radicali e fogliari crescenti, in condizione di carenza di calcio diventano marroni e si distaccano. Esercitando un ruolo simile all'azoto, la carenza di zolfo provoca ingiallimenti. I sintomi della carenza di magnesio nella maggior parte delle piante coltivate di solito compaiono sulle foglie più in alto e procedono sistematicamente verso le foglie basali. La caratteristica tipica della carenza di magnesio è l'accartocciamento delle foglie giovani, la riduzione dell'area e la clorosi delle foglie mature (Chen, H. e Fan, X., 2018). Nelle giovani foglie, la carenza di magnesio presenta i sintomi di depigmentazione più evidenti (Rustioni *et al.*, 2018). La carenza di zinco causa la formazione di foglie bronzate, l'arresto della crescita, la maturazione ritardata (Dobermann e Fairhurst 2000), comportando uno stress che provoca una perdita di rendimento produttivo (Kathun *et al.*, 2018). L'interazione tra zinco e ferro è un ulteriore fattore rilevante nel determinare la qualità del grano, in quanto questi microelementi si accumulano nella granella. Questi due elementi sono presenti nelle piante sotto forma di varie specie chimiche, che possono variare nella loro biodisponibilità (Grujic *et al.*, 2017). È noto che la carenza di ferro colpisce gli apici fogliari e le nervature e che questa condizione influenza la pigmentazione delle foglie distali, mentre le foglie basali sono molto meno colpite (Rustioni *et al.*, 2018). Il boro spesso porta a carenza o tossicità perché è un micronutriente unico per il quale i livelli soglia di carenza e tossicità sono molto stretti (Shireen *et al.*, 2018). A seconda dell'età e delle specie, le piante manifestano una vasta gamma di sintomi di carenza, tra cui crescita delle radici stentate, limitata crescita dei meristemi apicali, foglie fragili, ridotto contenuto di clorofilla e attività fotosintetica, interruzione del trasporto di ioni e riduzione del raccolto. I sintomi di carenza appaiono per la prima volta sulle foglie più giovani con accartocciamenti, una ridotta espansione delle foglie e macchie gialle sulla lamina fogliare (Shireen *et al.*, 2018).



Figura 5. Carenze su cereali di manganese (A C), zolfo (B) zinco (D) e magnesio (E) (<http://www.kali-gmbh.com>)

4.4. Fertilizzazione sostenibile

Vi è l'urgente necessità di identificare e valutare le pratiche di gestione in grado di mantenere la produttività nell'ambito dei cambiamenti climatici, mitigando le emissioni di gas serra dai singoli sistemi di coltivazione in specifiche condizioni pedoclimatiche (Necpalova *et al.*, 2018): suoli fertili e ben conservati sono per l'agricoltore uno strumento in più di competitività produttiva (Marandola, 2017). La sostenibilità del sistema agricolo si confronta oggi con la necessità di contemperare gli interessi aziendali degli agricoltori con la conservazione di un ambiente ecologicamente equilibrato, tramite l'adozione di pratiche agronomiche a ridotto impatto ambientale, capaci di garantire un oculato impiego dei fattori produttivi (Grignani *et al.*, 2003). Nella produzione intensiva, l'applicazione di fertilizzanti azotati spesso contribuisce a fornire azoto che supera notevolmente le richieste della coltura in atto, costituendo delle perdite nell'ambiente che possono contaminare i corpi idrici sotto forma di nitrati (Tei *et al.*, 2017). Lo sviluppo di strategie di fertilizzazione che migliorano l'efficienza dell'uso dell'azoto potrebbe ridurre sia l'impatto ambientale sia i costi di input superflui per gli agricoltori (Arregui *et al.*, 2008). Una produzione sostenibile richiede solo *inputs* di azoto e fosforo per compensare sia le asportazioni che le perdite inevitabili a livello di campo: è bene ricordare che le perdite di azoto sono positivamente correlate alle quantità di azoto distribuito (Roitero, 2010).

Al fine di garantire un'agricoltura più sostenibile, sarebbe bene incentivare il corretto impiego di matrici organiche già presenti all'interno del centro aziendale, riducendo

la frazione minerale. La sostituzione dell'azoto minerale con le fonti di azoto organico può favorire il ciclo del carbonio e dell'azoto nei terreni agricoli, anche se gli effetti a lungo termine devono ancora essere chiaramente dimostrati, specialmente nei terreni ad alta fertilità naturale (Hobley *et al.*, 2018). Inoltre, l'incremento e la variabilità del costo dei fertilizzanti, a cui si è assistito negli ultimi anni, hanno portato ad una riduzione della fertilizzazione minerale, soprattutto fosfatica, dimostrando che una riduzione di input è possibile senza particolari penalizzazioni delle produzioni (Moretti *et al.*, 2014).

A conferma del fatto che sia un tema di attualità, l'Europarlamento ha approvato il 24 ottobre 2017 un nuovo regolamento in materia di fertilizzanti, all'interno del quale promuove l'impiego di materiali riciclati per la produzione di nuovi concimi, contribuendo così allo sviluppo dell'economia circolare (Mambro, 2017). Inoltre, il suddetto regolamento facilita l'accesso al mercato per i fertilizzanti organici e innovativi, garantendo agli agricoltori ed ai consumatori una scelta più ampia e promuovendo l'innovazione verde (Mambro, 2017).

È bene sottolineare che la strategia europea messa in atto negli ultimi decenni, volta ad incentivare pratiche agricole garanti dell'ambiente, ha ridotto notevolmente i fenomeni di inquinamento delle acque da nitrati e l'eutrofizzazione (Relazione della Commissione Ambiente dell'Unione Europea, 2018). I dati sulla concentrazione di nitrati indicano che la qualità delle acque dolci e delle acque sotterranee è leggermente migliorata nel 2012-2015 rispetto al precedente periodo di monitoraggio (2008-2011). Oltre alla concentrazione di nitrati è diminuita anche l'eutrofizzazione, mentre le pratiche agricole sostenibili in relazione alla gestione dei nutrienti sono diventate più diffuse. Al contempo, la situazione nell'UE è eterogenea, con Stati membri in cui i programmi di azione stanno producendo buoni risultati e Stati membri in cui occorrono ulteriori interventi per ridurre e prevenire l'inquinamento. In generale, nonostante alcuni progressi positivi, il sovraccarico di nutrienti di origine agricola continua a rappresentare uno dei maggiori elementi di pressione sull'ambiente acquatico (Relazione della Commissione Ambiente dell'Unione Europea, 2018). L'uso sostenibile del suolo è un altro aspetto fondamentale nelle strategie internazionali di sviluppo sostenibile e la Misura 10 dei Psr è l'unico strumento che mette a disposizione dell'agricoltore le risorse necessarie per cogliere questo obiettivo (Marandola, 2017): al fine di incentivare l'uso sostenibile del suolo, i 21 Psr italiani dedicano quasi 500 milioni di euro, oltre il 10% delle risorse programmate per il periodo 2014-2020 (Marandola, 2017). Il suolo infatti è il primo fattore della produzione agricola ed usarlo in modo sostenibile significa garantire il recupero e/o la conservazione della sua fertilità chimica, fisica e microbiologica (Marandola, 2017).

5. Normativa di riferimento

La Commissione europea sta concentrando molte energie affinché ciascuno Stato Membro riduca il proprio impatto ambientale nel settore agricolo. L'aggiunta della "cross compliance" e del "greening" alla Politica Agricola Comune (PAC) tramite la riforma della PAC 2014 e 2020 (IEEP, 2011) e la diffusione della *Community Strategic Guidelines* (Consiglio europeo, 2009, 61/2009/CE), applicate con il Programma di Sviluppo Rurale (PSR), rappresentano solo alcuni degli sforzi più importanti che riguardano i cambiamenti climatici, il consumo di energia, la gestione delle risorse idriche, la biodiversità (CE, n. 74/2009) (Gaudino *et al.*, 2014). La Direttiva Nitrati (91/676 /CEE) è uno dei primi atti legislativi dell'UE volti direttamente al miglioramento della qualità dell'acqua e indirettamente al miglioramento della gestione dei reflui zootecnici. La Direttiva Nitrati, ora sotto l'egida della Direttiva Quadro sulle Acque (2000/60 /CE), è stata introdotta nel 1991 e limita l'applicazione di azoto zootecnico ai terreni agricoli al fine di ridurre le perdite associate ai corpi idrici (Buckley *et al.*, 2016). Dal 2011 è in vigore la deroga ai nitrati (2011/721/UE), per la quale è ammissibile un incremento dell'azoto organico da 170 kg N ha⁻¹ (limite imposto dalla Direttiva Nitrati) a 250 kg N ha⁻¹ agli agricoltori che rispettano alcuni requisiti relativi alla gestione del letame e del terreno (Acutis *et al.*, 2014): il Piemonte, insieme alla Lombardia, al Veneto e all'Emilia Romagna, è una delle regioni che può godere di queste agevolazioni. Nel contesto nazionale, sono stati inseriti alcuni Regolamenti italiani, come il Decreto Ministeriale del 19 aprile 1999 che approva il Codice di Buone Pratiche Agricole e quello del 7 aprile 2006 (che ha subito una revisione nel D.M 5046/2016) in merito ai criteri per la gestione del letame, più comunemente noto come Decreto Effluenti. A livello regionale sono due le fonti normative a cui il Piemonte fa riferimento: il 10/R/2007 e le Norme Tecniche di Produzione Integrata della Regione Piemonte (di cui si parlerà in dettaglio in seguito).

Se è vero che l'azoto viene gestito dalla Direttiva Nitrati, è altrettanto vero che la stessa attenzione non viene rivolta nei confronti del fosforo, in quanto non esiste una regolamentazione comunitaria che disciplini direttamente la sua gestione nei terreni agricoli. Alcuni Stati membri dell'UE affrontano la perdita di P attraverso regimi agroambientali volontari o attraverso la legislazione nazionale o regionale sotto gli auspici della Direttiva Nitrati, della Direttiva Quadro sulle Acque o della Direttiva sulle Emissioni Industriali (2010/75 / UE). Gli Stati membri non hanno restrizioni dirette per le applicazioni del fosforo al di fuori dei controlli indiretti applicabili ai sensi della Direttiva Nitrati: azoto e fosforo spesso vengono gestiti insieme, come nel caso dei concimi organici, in modo che le restrizioni sull'uso del primo influenzino spesso anche l'impiego del secondo (Buckley *et al.*, 2016).

Tanti sforzi si sono concentrati su cosa costituisca un sistema agricolo di alta qualità e sostenibilità, concetto in continua evoluzione (Gaudino *et al.*, 2014). Gli indicatori agro-ambientali si sono ampiamente diffusi a partire dai primi anni 2000, impiegati sia in Europa che fuori dall'Europa per valutare la sostenibilità agricola. I Consigli europei di Cardiff e poi Vienna (*Presidency Conclusion*, 1998) hanno sottolineato l'importanza di sviluppare indicatori ambientali per valutare l'impatto da parte di diversi settori economici, compresa l'agricoltura, e di monitorare l'impatto ambientale nelle politiche comunitarie. Il Consiglio europeo di Helsinki (*Presidency Conclusion*, 1999), infatti, ha messo in atto un piano creando una strategia di integrazione tra la dimensione ambientale e le pratiche agricole (Gaudino *et al.*, 2014). Allo stesso modo, l'Organizzazione per la Cooperazione e lo

Sviluppo Economico (OCSE), l'Agenzia Europea dell'Ambiente (AEA), la Direzione Generale (DG) Ambiente, nonché la DG Agricoltura e Sviluppo Rurale, il Centro Comune di Ricerca (CCR) e l'EUROSTAT hanno sviluppato tutti gli indicatori agroambientali come parte della riforma PAC 2014-2020. A partire dal 2005 è stata lanciata l'operazione IRENA, un indicatore agro-ambientale che monitora le emissioni nel campo agricolo (Gaudino *et al.*, 2014).

6. Il piano di concimazione

Sono proposti e descritti sinteticamente cinque metodi per il calcolo del piano di concimazione provenienti da quattro fonti normative, due nazionali e le due rispettive regionali, e da una fonte bibliografica, schematizzati come segue:

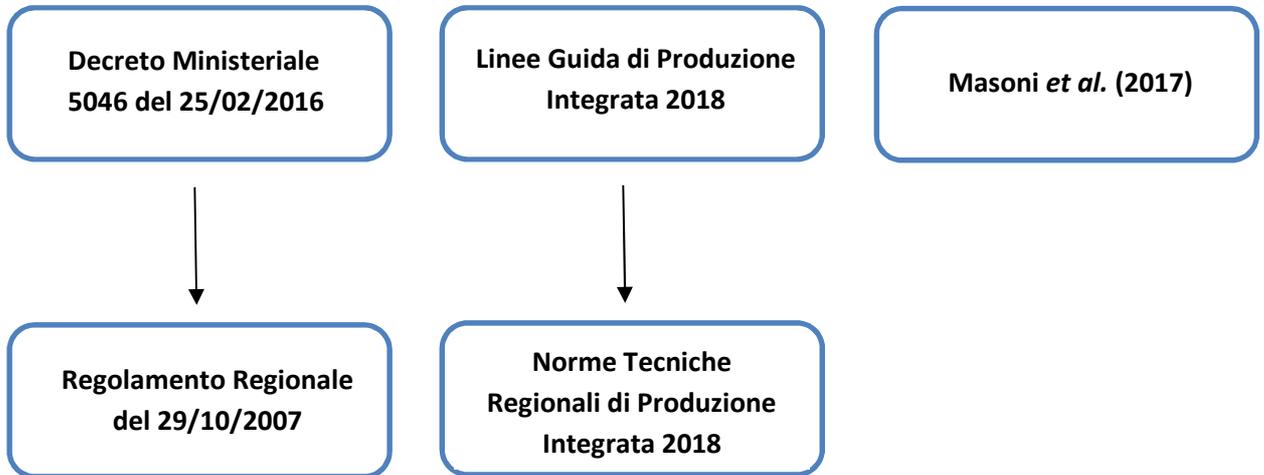


Figura 6. Presentazione dei cinque metodi per il calcolo del bilancio

Il D.M. 5046/2016, meglio conosciuto come “Nuovo Decreto Effluenti” è l’aggiornamento del D.M. del 7 Aprile 2006 (“Decreto Effluenti”), il quale è la ratifica della direttiva n. 1991/676/CE, comunemente denominata Direttiva Nitrati. Il Regolamento 10/R/2007 è infatti l’attuazione a livello regionale del Decreto Effluenti. Il secondo filone invece riguarda fa riferimento a tutti gli agricoltori che seguono le norme della produzione integrata. Il metodo di Masoni *et al.* (2017) è stato adottato in quanto si è voluto analizzare un nuovo approccio, fino ad ora solamente teorico.

6.1. Il Decreto Ministeriale 5046 del 25/02/2016

Vista la direttiva n. 1991/676/CE del Consiglio del 12 dicembre 1991, relativa alla protezione delle acque dall’inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole e vista la direttiva n. 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l’azione comunitaria in materia di acque, il Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali ha emanato il DM 5046 del 25/02/2016, conosciuto anche come “Decreto Effluenti e Digestato”.

6.1.1. Il piano di concimazione aziendale

Ai fini della corretta utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento, delle acque reflue e del digestato e di un accurato bilanciamento degli elementi fertilizzanti, sia in zone non vulnerabili che in zone vulnerabili da nitrati, le aziende devono predisporre di un Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA). Salvo il caso di variazioni sostanziali che ne richiedono l’aggiornamento, il PUA ha una durata massima di cinque anni ed è predisposto da:

- aziende ricadenti in aree vulnerabili che impiegano in un anno un quantitativo di azoto al campo da effluenti superiore a 6000 kg;
- allevamenti bovini con più di 500 Unità di Bestiame Adulto (UBA).

Nel caso di aziende in zona vulnerabile, che impiegano in un anno un quantitativo di azoto al campo da effluenti compreso tra 3000 kg e 6000 kg, è necessario predisporre di un Piano di Utilizzazione Agronomica Semplificato (PUAS). La redazione di un corretto PUAS viene demandato alle regioni, le quali possono predisporre di alcune forme semplificate riguardo:

- le dosi di azoto;
- i coefficienti di efficienza;
- tempi e modalità di distribuzione.

All'interno dell'Allegato V, Parte A del DM 5046/16, è descritto il PUA in applicazione della Direttiva Nitrati.

In ottemperanza alla Direttiva 91/76/CE, la procedura del PUA deve contemplare la determinazione di alcuni parametri idonei alla formulazione di un bilancio dell'azoto relativo al sistema suolo-pianta:

- il fabbisogno prevedibile di azoto delle colture;
- l'apporto alle colture di azoto proveniente dal suolo e dalla fertilizzazione.

I fabbisogni d'azoto delle colture sono calcolati attraverso l'uso di metodi del bilancio che può esser formulato dall'equazione 1:

$$(Y * B) = Nc + Nf + An + (kc * Fc) + (ko * Fo) \quad (1)$$

6.1.2. Le asportazioni colturali (Y*B)

Le asportazioni colturali, che compaiono al primo membro dell'equazione di bilancio, si calcolano moltiplicando i coefficienti unitari di asportazione (B), desumibili consultando il Codice di Buona Pratica Agricola (CBPA), per la produzione che, in virtù dei risultati ottenuti negli anni precedenti, si prevede di raggiungere.

6.1.3. Disponibilità di N derivante dagli apporti naturali (An)

All'interno di questa voce, il decreto include due flussi di apporti naturali, consistenti nella fornitura di azoto proveniente dal suolo e nell'apporto di azoto derivante dalle deposizioni atmosferiche. Nel primo caso, l'azoto disponibile è correlato con la concentrazione di sostanza organica nel suolo. La normativa fa riferimento al CBPA per la determinazione di questa voce: stima che, nel periodo in cui la mineralizzazione è maggiormente accentuata (primavera-autunno), la materia organica possa dotare il suolo di 30 kg N ha⁻¹ per ogni unità percentuale di sostanza organica. Invece, l'apporto annuale di azoto collegato alle deposizioni atmosferiche è pari a circa 20 kg N ha⁻¹.

In entrambi i casi, la disponibilità effettiva di azoto deve esser modulata in funzione della durata del ciclo colturale ed è valutata in considerazione della temperatura e delle precipitazioni. Per questa ragione è stato introdotto il coefficiente tempo (Kt) pari a:

- 0,60 per i cereali autunno-vernini;
- 0,67 per la bietola e il girasole;
- 0,75 per il sorgo;
- 1 per il mais.

6.1.4. Disponibilità di N derivante da precessioni colturali (Nc)

Il DM 5046/16 include questo parametro nel bilancio solo nel caso in cui la precessione colturale sia erba medica oppure un prato di lunga durata. In queste circostanze, la fornitura di azoto assimilabile è dell'ordine di 80 kg ha⁻¹ per i medicaia di tre anni in buone condizioni e prati di oltre cinque anni, 60 kg ha⁻¹ per i medicaia diradati e 30-40 kg ha⁻¹ per i prati di trifoglio ed i prati di breve durata. Nel momento in cui i residui della precessione colturale sono dotati di un rapporto C:N superiore a 30, l'immobilizzazione dell'azoto diventa il processo predominante: se fossero interrate le paglie dei cereali o gli stocchi del mais, l'azoto assimilabile per la coltura successiva si ridurrebbe rispettivamente a -30 kg ha⁻¹ ed a -40 kg ha⁻¹.

6.1.5. Disponibilità di N derivante dalle fertilizzazioni organiche effettuate nell'anno precedente (Nf)

Il DM 5046/16 considera questa voce solamente se nell'anno precedente è stato apportato letame, escludendo pertanto le altre matrici organiche. La disponibilità di azoto derivante dall'apporto di letame dell'anno precedente è pari ad una percentuale minima del 30% dell'azoto apportato.

6.1.6. Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza (kc * Fc e ko * Fo)

Gli apporti di azoto tramite concime minerale (Fc) e concime organico (Fo) sono accompagnati dai loro relativi coefficienti di efficienza, kc e fc. Se per i concimi minerali viene assegnata un'efficienza pari al 100%, per i concimi organici la situazione è più specifica, in quanto varia in funzione della coltura, dell'epoca e della modalità di distribuzione e delle strutture del suolo. L'obiettivo preposto dal DM 5046/16 è di ottimizzare gli apporti, al fine di conseguire la massima efficienza d'impiego dei diversi fertilizzanti. I valori di riferimento di ko, validi solo per il liquame, si ottengono secondo le indicazioni contenute nella Tabella 8 e nella Tabella 9. Per stabilire il coefficiente di efficienza, occorre dapprima stabilire il livello di efficienza (basso, medio, alto) in relazione alla modalità ed epoca di intervento, come in Tabella 8; successivamente si può associare al livello di efficienza uno specifico valore in funzione del tipo di effluente e della classe tessiturale, come riportato in Tabella 9. Per quanto concerne il letame, il decreto assegna un valore di efficienza unico pari al 40%.

Tabella 8. Efficienza dell'azoto del liquame in base alla coltura, alla modalità ed epoca di distribuzione

Colture	Epoche	Modalità	Efficienza
Mais, sorgo da granella, erbai primaverili-estivi	Prearatura primaverile	Su terreno nudo o stoppie	Alta
	Prearatura estiva o autunnale	Su paglie o stocchi	Media
		Su terreno nudo o stoppie	Bassa
	Copertura	Con interrimento	Alta
Senza interrimento		Media	
Cereali autunno-vernini ed erbai autunno-primaverili	Prearatura estiva	Su paglie o stocchi	Media
	Prearatura estiva	Su terreno nudo o stoppie	Bassa
	Fine inverno e primavera	Copertura	Media
Colture di secondo raccolto	Estiva	Preparazione del terreno	Alta
	Estiva in copertura	Con interrimento	Alta
		Senza interrimento	Media
	Fertirrigazione	Copertura	Media
Prati di graminacee misti o medicali	Prearatura primaverile	Su paglie o stocchi	Alta
		Su terreno nudo o stoppie	Media
	Prearatura estiva o autunnale	Su paglie o stocchi	Media
		Su terreno nudo o stoppie	Bassa
	Dopo i tagli primaverili o estivi	Con interrimento	Alta
		Senza interrimento	Media
Autunno precoce	Con interrimento	Media	
		Senza interrimento	Bassa

Tabella 9. Coefficienti di efficienza dei liquami di bovini, suini e avicoli

Efficienza	Tessitura grossolana			Tessitura media			Tessitura fine		
	Avicoli	Suini	Bovini (1)	Avicoli	Suini	Bovini (1)	Avicoli	Suini	Bovini (1)
Alta	0,84	0,73	0,62	0,75	0,65	0,55	0,66	0,57	0,48
Media	0,61	0,53	0,45	0,55	0,48	0,41	0,48	0,42	0,36
Bassa	0,38	0,33	0,28	0,36	0,31	0,26	0,32	0,28	0,24

(1) I coefficienti di efficienza indicati per i liquami bovini possono ritenersi validi anche per i materiali palabili non soggetti a processi di maturazione e/o compostaggio

6.2. Il Regolamento Regionale del 29 ottobre 2007, n. 10/R

Vista la direttiva n. 1991/676/CE del Consiglio del 12 dicembre 1991, relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole, la Regione Piemonte ha emanato il Regolamento regionale del 29 ottobre 2007.

6.2.1. Il piano di concimazione aziendale

Ai fini della corretta utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento, le aziende devono predisporre di un Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA). Il PUA deve esser predisposto da:

- aziende ricadenti in aree vulnerabili che impiegano in un anno un quantitativo di azoto al campo da effluenti superiore a 6000 kg;
- allevamenti intensivi, nonché allevamenti bovini con più di 500 UBA.

Nel caso in cui ci fossero aziende che adoperano un quantitativo di azoto al campo da effluenti zootecnici o da digestato superiore a 3.000 kg e inferiore o uguale a 6.000 kg, è sufficiente predisporre un PUA nella sua forma semplificata (PUAS).

Il PUA ha validità quinquennale, purchè non subentrino modifiche significative delle tecniche agronomiche. Il surplus di bilancio a scala colturale viene calcolato come segue nell'equazione 2:

$$S = Nc + Mso + An + Bfx + (kc * Fc) + (ko * Fo) - (Y * B) \quad (2)$$

La metodologia di calcolo del PUAS è la medesima del PUA, ma la voce di bilancio Nc viene trascurata ed il coefficiente ko è fisso, pari al valore di efficienza media.

6.2.2. Le asportazioni colturali (Y*B)

Le asportazioni colturali, che compaiono al secondo membro dell'equazione di bilancio, si calcolano moltiplicando i coefficienti unitari di asportazione (B), per la produzione che si prevede di raggiungere.

6.2.3. Disponibilità di N derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica (Mso)

Il Regolamento 10/R/2007 quantifica questa voce in base alla concentrazione di sostanza organica presente nel suolo. Vengono attribuiti 30 kg N ha⁻¹ per ogni punto percentuale di sostanza organica nel terreno; tuttavia, la disponibilità effettiva di azoto deve esser regolata in base al coefficiente tempo (kt), così definito:

- per le colture poliennali pari a 1;
- per il mais, sorgo e prati pari a 0,75;
- per i cereali autunno-vernini, leguminose da granella, semi oleosi ed erbai foraggeri pari a 0,67;
- per le orticole a 0,4.

6.2.4. N derivante dagli apporti naturali (An)

Si considera un apporto naturale annuale fisso, pari a 20 kg N ha⁻¹, svincolando An dalla tipologia colturale e dal suo relativo coefficiente tempo.

6.2.5. Disponibilità di N derivante da precessioni colturali (Nc)

Il Regolamento 10/R/2007 esamina questa voce solo per alcuni casi specifici, ricalcando la linea generale fornita dal DM 5046/16. In queste circostanze, la fornitura di azoto assimilabile è dell'ordine di 80 kg ha⁻¹ per i medicaì di tre anni in buone condizioni e prati di oltre cinque anni, 40 kg ha⁻¹ per i prati di trifoglio di almeno due anni e 30 kg ha⁻¹ per i prati di graminacee e leguminose. Nel momento in cui i residui della precessione colturale sono dotati di un rapporto C:N superiore a 30 e sono sottoposti a successivo interrimento, l'immobilizzazione dell'azoto diventa il processo predominante: l'azoto assimilabile si riduce a -30 kg ha⁻¹ per le paglie dei cereali ed a -40 kg ha⁻¹ per gli stocchi del mais.

6.2.6. Disponibilità di N derivante da azotofissazione (Bfx)

Il regolamento conferisce all'azotofissazione un valore tale da poter soddisfare il fabbisogno colturale, intendendo quindi superflue le successive fertilizzazioni.

6.2.7. Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza (kc * Fc e ko * Fo)

Gli apporti di azoto tramite concime minerale (Fc) e concime organico (Fo) sono accompagnati dai loro relativi coefficienti di efficienza, kc e kc. Se per i concimi minerali viene assegnata un'efficienza pari al 100%, per i concimi organici la situazione è più complessa, in quanto varia in base alla coltura, all'epoca ed alla

modalità di distribuzione e delle strutture del suolo. In Tabella 10 vengono riportati i principali coefficienti di efficienza:

Tabella 10. Efficienza degli apporti di azoto organico in funzione del tipo di reflu, della coltura, dell'epoca e modalità di distribuzione

Coltura	Modalità di distribuzione	Epoca di distribuzione	Efficienza per materiali palabili*	Efficienza per materiali non palabili
Coltura a ciclo autunno-vernino o autunno-primaverile, compresi erbai	Copertura con interrimento	Primavera		0,70
	Copertura senza interrimento	Primavera	0,55	0,70
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Primavera o estate	0,50	0,65
	Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria, con interrimento	Estate		0,55
	Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria, senza interrimento	Estate	0,55	0,30
	Dopo la raccolta, in fertirrigazione sulla coltura secondaria	Estate		0,70
	Dopo la raccolta, in presemina di una coltura secondaria	Estate	0,55	0,55
	Dopo la raccolta, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie	Estate	0,55	0,30
	Copertura con interrimento	Autunno		0,55
	Copertura senza interrimento	Autunno	0,55	0,30
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Autunno	0,50	0,65
Colture a ciclo primaverile-estivo o estivo, compresi erbai	Pre-aratura, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie	Primavera	0,70	0,70
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Primavera o estate	0,50	0,65
	Copertura con interrimento	Estate		0,70
	Copertura senza interrimento	Estate	0,55	0,55
	Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria	Autunno	0,55	0,30
	Dopo la raccolta, in presemina di una coltura secondaria	Autunno	0,55	0,55
	Dopo la raccolta, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie	Autunno	0,55	0,30
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Autunno	0,50	0,65

6.3. Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018

Redatte dal Gruppo Tecnico Agronomico (GTA) e successivamente approvate dall'Organismo Tecnico Scientifico (OTS) della Direzione Generale dello Sviluppo Rurale, le *Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018* rappresentano un documento a cui possono aderire tutti gli operatori, in forma singola o associata, appartenenti alle categorie di agricoltori, condizionatori, trasformatori o distributori. Questo disciplinare definisce i criteri generali in materia di tecniche agronomiche, volte a ridurre al minimo l'uso delle sostanze chimiche di sintesi e a razionalizzare la fertilizzazione, nel rispetto dei principi ecologici, economici e tossicologici.

L'obiettivo prefissato è di raggiungere un equilibrio tale da poter coniugare le tecniche produttive sia con la tutela dell'ambiente naturale sia con le esigenze tecnico-economiche dei moderni sistemi produttivi e di innalzare il livello di salvaguardia della salute degli operatori e dei consumatori.

6.3.1. La fertilizzazione

Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 riportano informazioni circa la fertilizzazione per ciascuna coltura, al fine di garantire produzioni di elevata qualità e in quantità economicamente sostenibili, rispettando al contempo le esigenze di salvaguardia ambientale, il mantenimento della fertilità del suolo e la prevenzione dalle avversità. Per assicurare una soddisfacente fertilizzazione, il Gruppo Tecnico Scientifico definisce alcuni standard tecnici agronomici che gli operatori aderenti devono rispettare:

- è necessario prevedere la realizzazione delle analisi fisico-chimiche del suolo per la stima dei macroelementi e degli altri principali parametri della fertilità, in quanto deve restituire informazioni relative alla granulometria, al pH, alla capacità di scambio cationica (CSC), alla sostanza organica, al calcare totale e al calcare attivo, all'azoto totale, al fosforo assimilabile ed al potassio scambiabile. È richiesta l'attuazione di almeno un'analisi per ciascuna area omogenea dal punto di vista pedologico e agronomico. È obbligatorio effettuare delle analisi periodiche ogni cinque anni, se il suolo è destinato a colture erbacee, mentre, nel caso in cui fosse interessato dalla presenza di colture arboree, è sufficiente compiere le analisi all'avvio dell'impianto frutticolo;
- occorre prevedere l'impiego preferenziale dei fertilizzanti organici a discapito di quelli minerali, valorizzando la matrice organica e al contempo la fertilità fisica, chimica e biologica del suolo. Nelle zone vulnerabili è obbligatorio il rispetto dei quantitativi massimi annui distribuiti, stabiliti in applicazione della Direttiva 91/676/CEE pari a 170 kg N ha^{-1} .
- È indispensabile quantificare il limite degli apporti massimi dei macroelementi nutritivi distribuiti per coltura o per ciclo colturale sulla base di alcune precise valutazioni, tra cui rientrano le asportazioni, le disponibilità dei macroelementi nel suolo, le perdite tecnicamente inevitabili causate da percolazione ed emissione, l'avvicendamento colturale e le tecniche di coltivazione adottate.

Questi aspetti vengono analizzati e successivamente sviluppati all'interno di un piano di concimazione.

6.3.2. Piano di concimazione aziendale

La corretta gestione della concimazione organica e minerale viene garantita dalla redazione di un piano di concimazione aziendale. A tal riguardo, le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 propongono un bilancio per ciascuno dei tre macronutrienti, azoto, fosforo e potassio. Inoltre, definiscono alcuni standard tecnici di riferimento che i soggetti aderenti devono perseguire, tra cui:

- le analisi del terreno, effettuate su campioni rappresentativi e correttamente interpretate, ricoprono un ruolo cardine per la stesura del piano di concimazione, pertanto è necessario averle disponibili prima della redazione del piano stesso;
- il piano di concimazione deve esser riferito ad una zona omogenea a livello aziendale o sub-aziendale;

- i fabbisogni dei macronutrienti devono essere determinati sulla base della produzione ordinaria attesa o stimata (dati ISTAT o medie delle tre annate precedenti per la zona in esame) e devono essere calcolati adottando il metodo del bilancio. Per quanto concerne l'apporto di microelementi, il disciplinare non fornisce prescrizioni a riguardo, ad eccezione del rame, il cui eventuale apporto concorre al raggiungimento del limite previsto per i prodotti fitosanitari;
- nelle aree definite "vulnerabili" devono in ogni caso essere rispettate le disposizioni derivanti dai programmi d'azione obbligatori di cui all'art.92, comma 6 del decreto legislativo 3 aprile 2006 n. 152 in attuazione della direttiva del Consiglio 91/676/CE del 12 dicembre 1991;
- nel caso di doppia coltura o di più cicli di coltivazione della stessa coltura ripetuti, gli apporti di fertilizzanti devono essere calcolati per ogni coltura o ciclo colturale. Inoltre, nel calcolo occorre tenere conto delle sole asportazioni e precessioni colturali, ma non dei parametri di dilavamento o altri aspetti che hanno valenza solo per la coltura principale.

In alternativa alla redazione di un piano di fertilizzazione analitico, è possibile ricorrere all'impiego delle schede a dose standard per coltura, elaborate e approvate a livello nazionale e successivamente declinate a livello regionale. La dose standard va intesa come la dose di macroelemento da prendere come riferimento in condizioni di resa produttiva, di fertilità del suolo e di condizioni climatiche ritenute ordinarie. Tuttavia, la dose standard può essere modulata in funzione di alcune situazioni particolari, individuate all'interno della scheda di fertilizzazione. Pertanto, sono possibili incrementi, se si prevedono:

- una maggiore produzione rispetto a quella definita come standard;
- casi di scarsa vigoria della coltura;
- una scarsa dotazione di sostanza organica del suolo;
- eccessivo dilavamento del suolo da forti piogge invernali.

Al contrario, si adoperano delle riduzioni rispetto alla dose standard laddove sussistano una delle seguenti condizioni:

- minore produzione rispetto a quella individuata come standard;
- eccessiva vigoria o lunghezza del ciclo vegetativo della coltura;
- apporto di ammendanti;
- elevato tenore di sostanza organica del suolo.

Al fine di agevolare la stesura di un corretto piano di concimazione, Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 forniscono un bilancio volto a calcolare gli apporti dei macronutrienti, come di seguito riportato: (equazione 3, 4, 5)

$$N = A - B + C + D - E - F - G \quad (3)$$

$$P_2O_5 = A \pm (B * H) \quad (4)$$

$$K_2O = A + (B * H) + C \quad (5)$$

Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 non richiedono la stesura del piano di fertilizzazione nelle situazioni in cui non venga praticata alcuna fertilizzazione.

6.3.3. Fabbisogni colturali (A)

I fabbisogni colturali si definiscono in funzione dell'esigenza della coltura, determinato sia sulla base degli assorbimenti colturali che dalla produzione attesa, secondo quanto indicato nell'equazione 6:

$$A \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{assorbimenti colturali unitari (\%)} * \text{produzione attesa (t ha}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 intendono per assorbimento colturale unitario la quantità di elemento per unità di prodotto assorbita dalla coltura che si allontana dal sistema suolo, localizzandosi nei frutti e negli altri organi, quali culmo, fusto, foglie e radici. Inoltre il disciplinare mette a disposizione una tabella di riferimento all'interno della quale vengono specificati i coefficienti di assorbimento per azoto, fosforo e potassio per ciascuna coltura.

6.3.4. Apporti derivanti dalla fertilità del suolo (B)

Al fine di definire correttamente questa voce, il disciplinare analizza questo parametro specificamente per ogni singolo elemento nutritivo, in quanto la determinazione della quantità di elemento reso disponibile alla pianta risulta diversificato a seconda che si esamini l'azoto, il fosforo o il potassio.

Gli apporti di azoto derivanti dalla fertilità del suolo sono costituiti dall'azoto immediatamente disponibile per la coltura, definito come azoto pronto, e dall'azoto prodotto dalla mineralizzazione della sostanza organica.

La quota di azoto pronto nel terreno si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale nel suolo; la frazione disponibile incrementa al crescere della classe granulometrica, secondo come riportato in Tabella 11.

Tabella 11. Quantità di azoto prontamente disponibile (kg N ha⁻¹; Regione Campania)

Tessitura	kg N pronto	Densità apparente
Tendenzialmente sabbioso	28,4 * N totale (‰)	1,42
Franco	26 * N totale (‰)	1,30
Tendenzialmente argilloso	24,3 * N totale (‰)	1,21

L'azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica si misura sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo nei primi 20 cm di profondità e del rapporto C:N, così come descritto nella Tabella 12. Si verifica una più consistente frazione di azoto mineralizzato in condizioni di tessitura sabbiosa e con un rapporto C:N ridotto.

Tabella 12. Azoto mineralizzato (kg N ha⁻¹) che si rende disponibile in un anno

Tessitura	C:N		
	<9	9-12	>12
Tendenzialmente sabbioso	42 * S.O (%)	36 * S.O (%)	24 * S.O (%)
Franco	26 * S.O (%)	24 * S.O (%)	20 * S.O (%)
Tendenzialmente argilloso	18 * S.O (%)	12 * S.O (%)	6 * S.O (%)

Gli apporti di azoto sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa, pertanto nel calcolo di questa quota è necessario considerare il coefficiente tempo (k_t), pari a 1 se la coltura occupa il terreno tutto l'anno, come nel caso delle colture arboree e del prato permanente, pari a 0,3 per le orticole a ciclo breve (< 3 mesi); in tutte le altre situazioni intermedie, il k_t delle altre colture è

modulato in relazione al regime termico e pluviometrico del periodo in cui avviene la crescita: è pari a 0,6 per le colture a ciclo autunno-vernino, 0,67 per la barbabietola ed il riso e 0,75 per il mais e la soia.

Per quanto riguarda il fosforo e il potassio, la loro disponibilità derivante dalla fertilità del suolo è stimata sulla base della dotazione di P assimilabile e K scambiabile. Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 propongono di utilizzare 3 o 4 classi di dotazione, a seconda che si faccia riferimento al potassio o al fosforo, (Tabelle 13 e 14). Se la dotazione di P e K è media, viene quindi consentito il ricorso ad una concimazione che ricopra le asportazioni delle colture, se la dotazione è bassa o molto bassa, viene permessa una concimazione di arricchimento, mentre se la dotazione è elevata, vige l'obbligo di ricorrere ad una riduzione della quota.

Tabella 13. Dotazione di P Olsen assimilabile (ppm)

Giudizio	Dotazione di P Olsen (ppm)	Soglia di concimazione permessa
Molto basso	< 5	Concimazione di arricchimento
Basso	5 – 10	Concimazione di arricchimento
Medio	11 – 30	Concimazione pari agli asporti delle colture
Elevato	>30	Sospensione concimazione

Tabella 14. Dotazione di K scambiabile (ppm)

Giudizio	Dotazione di K scambiabile (ppm)			Soglia di concimazione permessa
	Terreno tendenzialmente sabbioso	Terreno franco	Terreno tendenzialmente argilloso	
Basso	< 80	<100	<120	Concimazione di arricchimento
Medio	80 – 120	100 - 150	120 – 180	Concimazione pari agli asporti delle colture
Elevato	>120	>150	>180	Sospensione concimazione

6.3.5. Immobilizzazione (H)

Il fattore di immobilizzazione è legato solo al fosforo ed al potassio e tiene conto della quantità di elemento nutritivo che viene resa indisponibile ad opera di processi chimico-fisici, qualora sia necessario procedere ad una concimazione di arricchimento; viene calcolato nel seguente modo:

$$H_{\text{fosforo}} = a + (0,02 * \text{calcare totale } \%) \quad (7)$$

con a = 1,2 per un terreno tendenzialmente sabbioso, 1,3 per un terreno franco, 1,4 per un terreno tendenzialmente argilloso,

$$H_{\text{potassio}} = 1 + (0,018 * \text{argilla } \%) \quad (8)$$

6.3.6. Perdite per lisciviazione (C)

Le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 fanno riferimento alle perdite per lisciviazione sia per l'azoto che per il potassio. Per quanto riguarda l'azoto, possono essere stimate prendendo in considerazione o l'entità delle precipitazioni o la tessitura e la facilità di drenaggio del terreno. Nel primo caso, se le piogge sono concentrate nel periodo autunno-invernale, si deve considerare dilavabile quella

quota di azoto che all'interno del bilancio viene classificato come "N pronto". Altrimenti, se le precipitazioni risultano abbondanti durante tutto l'anno, alla frazione di N pronto deve essere aggiunta anche una parte derivante dalle concimazioni e dalla mineralizzazione della sostanza organica. Le perdite per lisciviazione nel periodo autunno invernale sono stimate prendendo come riferimento l'entità delle precipitazioni nell'intervallo di tempo compreso dal primo ottobre al 31 gennaio come di seguito riportato:

- con pioggia <150 mm: nessuna perdita:
- con pioggia compresa fra 150 e 250 mm: perdita dell'azoto pronto progressivamente crescente, come riportato nell'equazione 9

$$x = (y - 150) \quad (9)$$

in cui x è la percentuale di azoto pronto perso e y è la pioggia (mm) nel periodo ottobre – gennaio;

- con pioggia >250 mm: tutto l'azoto pronto viene dilavato.

Applicando il secondo metodo, la quantità di azoto perso per lisciviazione in funzione del drenaggio e della tessitura può essere stimata adottando lo schema proposto in Tabella 15.

Tabella 15. Azoto (kg N ha⁻¹) lisciviato in base alla facilità di drenaggio e della tessitura

Drenaggio	Terreno tendenzialmente sabbioso	Terreno franco	Terreno tendenzialmente argilloso
Lento	50	40	50
Normale	40	30	20
Rapido	50	40	30

Per quanto riguarda il potassio, l'entità delle perdite per lisciviazione vengono quantificate ponendole in relazione alla facilità del drenaggio (Tabella 16) o al suo contenuto di argilla (Tabella 17), come di seguito riportato:

Tabella 16. Potassio lisciviato (kg K₂O ha⁻¹) in base al drenaggio e alla tessitura

Drenaggio	Terreno tendenzialmente sabbioso	Terreno franco	Terreno tendenzialmente argilloso
Lento o normale	25	18	7
Rapido	35	25	17

Tabella 17. Potassio lisciviato (kg K₂O ha⁻¹) in base alla concentrazione di argilla %

Argilla %	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
0 – 5	60
5 – 15	30
15 – 25	20
>25	10

6.3.7. Perdite per immobilizzazione e dispersione (D)

Il disciplinare fornisce indicazioni circa l'analisi di questo parametro solo per quanto riguarda l'azoto, non attribuendo indicazioni a riguardo per il fosforo ed il potassio. La quantità di azoto immobilizzato dalla biomassa del suolo o attraverso processi di

adsorbimento chimico-fisico, nonché per processi di volatilizzazione e denitrificazione si calcola come percentuale degli apporti di azoto provenienti dalla fertilità del suolo, ricorrendo all'equazione 10: sono introdotti inoltre i fattori di correzione, i quali variano a seconda del drenaggio e della tessitura, assumendo come valore massimo 0,40, nel caso di un terreno argilloso a drenaggio lento, e come valore minimo 0,15 nel caso di un terreno sabbioso a drenaggio rapido.

$$D = B * fc \quad (10)$$

6.3.8. Azoto da residui della coltura in precessione (E)

Il disciplinare fa riferimento solo all'azoto che viene eventualmente reso disponibile per la coltura, tralasciando pertanto gli altri due elementi nutritivi. In questa circostanza, le Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 forniscono dei valori tabellari (Tabella 18) positivi o negativi per quantificare l'azoto derivante dalla coltura in precessione.

Tabella 18. Azoto disponibile (kg N ha⁻¹) in funzione della coltura in precessione

Coltura	N da residui (kg ha ⁻¹)
Barbabietola	30
Cereali autunno-vernini (paglia interrata)	-30
Mais (stocchi interrati)	-40
Medicaio	80
Prato polifita con leguminose tra il 5 – 15%	40
Soia	10
Leguminose da granella	40
Orticole	30

6.3.9. Azoto da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (F)

L'azoto derivante da fertilizzazioni organiche negli anni precedenti si rende disponibile nell'arco dell'intero anno, perciò deve essere considerato il coefficiente tempo di riferimento. L'azoto da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti varia a seconda della matrice organica impiegata e della frequenza con cui viene apportata, così come riportato in Tabella 19. Nel caso di apporti saltuari, la percentuale di azoto recuperato disponibile nel secondo anno è pari al 20%.

Tabella 19. Apporti regolari di fertilizzanti organici: % di N recuperato annuo

Matrici organiche	Annuale	Ogni due anni	Ogni tre anni
Ammendanti	50	30	20
Liquame bovino	30	15	10
Liquame suino e pollina	15	10	5

6.3.10. Azoto da apporti naturali (G)

Questa voce prende in considerazione il quantitativo di azoto che giunge al terreno mediante deposizione atmosferica e, qualora ci fossero delle leguminose, anche quello derivante dall'azotofissazione. Secondo il disciplinare, l'entità delle deposizioni è pari a 20 kg N ha⁻¹, valore che tuttavia deve essere modulato in funzione del coefficiente tempo della coltura in atto; mentre, per quanto riguarda i fenomeni di azotofissazione, occorre che siano valutati in relazione alle specifiche caratteristiche della specie leguminosa coltivata.

6.3.11. Efficienza dell'azoto, fosforo e potassio apportati con i fertilizzanti

Rispetto al fosforo e potassio, l'azoto è dotato di una maggiore mobilità nel sistema suolo: per ridurre al minimo le perdite per lisciviazione e massimizzare l'efficienza della concimazione, occorre distribuire l'azoto nelle fasi di maggior necessità delle colture. Il frazionamento dell'azoto è obbligatorio quando il quantitativo da distribuire per singolo intervento supera i 100 kg N ha⁻¹ per le colture erbacee ed orticole, tuttavia questo vincolo non si applica per le quote di azoto a lenta cessione. Inoltre è specificato che i concimi organo minerali con tasso di umificazione e titolo di Carbonio umico e fulvico non inferiore rispettivamente al 35 % e al 2,5 %, vengono considerati a "rilascio graduale" ed equiparati ai concimi a lenta cessione (D.L. n° 75/2010 Allegato 1 punto 6 – Disciplina in materia di fertilizzanti). Il disciplinare ribadisce che le concimazioni azotate sono consentite solo in presenza della coltura o al momento della semina in quantità contenute, ad eccezione dei seguenti casi:

- in presenza di colture annuali a ciclo primaverile estivo, purché la distribuzione avvenga in tempi prossimi alla semina;
- in presenza di colture a ciclo autunno vernino, in ambienti in cui non sussistano rischi di perdite per lisciviazione e comunque con apporti inferiori a 30 kg ha⁻¹;
- qualora sussista la necessità di apportare fosforo o potassio in forme meglio utilizzabili dalle piante, ricorrendo a concimi organo-minerali o organici; in questi casi la somministrazione di N in presemina non può comunque essere superiore a 30 kg ha⁻¹.

Per l'impiego di ammendanti organici non vengono fissati vincoli specifici relativi all'epoca della loro distribuzione e al frazionamento.

Per i concimi minerali di sintesi e per il fosforo ed il potassio dei concimi organici si assume un valore di efficienza pari al 100 %. Al fine di determinare la quantità di azoto effettivamente disponibile per la coltura derivante dall'impiego di liquami e pollina, è necessario prendere in considerazione un coefficiente di efficienza, variabile in relazione all'epoca e modalità di distribuzione, alla coltura, al tipo di effluente e alla tessitura del terreno. Inoltre, viene attuata un'ulteriore distinzione a seconda della quantità di azoto distribuita per singolo intervento, in quanto apporti consistenti in un'unica soluzione hanno una minor efficienza rispetto alle distribuzioni di minor entità e frazionate nel tempo. Per stabilire il coefficiente di efficienza, bisogna dapprima stabilire il livello di efficienza (basso, medio, alto) in relazione alla modalità ed epoca di intervento, come in Tabella 20; successivamente si può associare al livello di efficienza uno specifico valore in funzione del tipo di effluente e della tessitura, come riportato in Tabella 21. Per quanto riguarda l'efficienza del letame bovino maturo e degli altri ammendanti, il disciplinare stabilisce un valore medio pari al 40 %.

Sommando i coefficienti di efficienza degli effluenti zootecnici ed il coefficiente di recupero di azoto in funzione alla periodicità con cui vengono effettuati gli apporti, si nota come si possa raggiungere un'efficienza globale che fluttua tra il 30%, nel caso della distribuzione ogni tre anni di un'elevata dose di liquame suino su un terreno argilloso, ed il 100%, nel caso di una distribuzione annuale di una dose ridotta di liquame bovino su terreno sabbioso. Tuttavia, nel caso si distribuisse annualmente o ogni due anni una ridotta dose di pollina, l'efficienza totale sarebbe pari rispettivamente al 106% e 101%, rappresentando quindi una situazione irrealistica.

Tabella 20. Livello di efficienza dei fertilizzanti organici non palabili in funzione della coltura, epoca e modalità di distribuzione

Gruppo colturale e ciclo	Modalità di distribuzione in relazione alla coltura e all'epoca	Efficienza
Primaverili-estive	Su terreno nudo o stoppie prima della preparazione del terreno nell'anno successivo	Bassa
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno nell'anno successivo	Media
	Prima della preparazione del terreno nel medesimo anno	Alta
	In copertura con fertirrigazione	Media
	In copertura con fertirrigazione a bassa pressione	Alta
	In copertura con interrimento	Alta
	In copertura in primavera senza interrimento	Media
Autunno-vernine	In copertura in estate senza interrimento	Bassa
	Su terreno nudo o stoppie prima della preparazione del terreno	Bassa
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno	Media
	Presemina	Bassa
Secondi raccolti	In copertura in fase di accestimento	Media
	In copertura in fase di levata	Alta
	Presemina	Alta
	In copertura con fertirrigazione	Media
	In copertura con interrimento	Alta
Pluriennali erbacee	In copertura senza interrimento	Bassa
	Su terreno nudo o stoppie prima della preparazione del terreno nell'anno successivo	Bassa
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno nell'anno successivo	Media
	Prima della preparazione del terreno nel medesimo anno	Alta
	Ripresa vegetativa e tagli primaverili	Alta
	Tagli estivi o autunnali precoci	Media

Tabella 21. Coefficienti di efficienza in funzione del tipo di effluente e della dose apportata

Tipo effluente	Efficienza	Tessitura grossolana			Tessitura franca			Tessitura fine		
		Dose			Dose			Dose		
		Bassa	Media	Alta	Bassa	Media	Alta	Bassa	Media	Alta
Liquame suino	Alta	79	73	67	71	65	58	63	57	50
	Media	57	53	48	52	48	43	46	42	38
	Bassa	35	33	29	33	31	28	29	28	25
Liquame bovino	Alta	67	62	57	60	55	49	54	48	43
	Media	48	45	41	44	41	37	39	36	32
	Bassa	30	28	25	28	26	24	25	24	21
Pollina	Alta	91	84	77	82	75	67	72	66	58
	Media	66	61	55	60	55	49	53	48	44
	Bassa	40	38	33	38	36	32	33	32	29

6.4. Le Norme Tecniche di Produzione Integrata 2018 della Regione Piemonte

Per la produzione agricola integrata della Regione Piemonte si fa riferimento agli impegni previsti dalle Norme Tecniche, redatte in conformità alle Linee Guida

Nazionali di Produzione Integrata 2018 e approvate con Determinazione Dirigenziale del Settore Fitosanitario e dei Servizi tecnico-scientifici n°230 del 14 febbraio 2018.

6.4.1. Il piano di concimazione aziendale

Per ciò che concerne il piano di concimazione aziendale, le Norme Tecniche di Produzione Integrata 2018 prevedono il rispetto di alcuni punti vincolanti per i soggetti aderenti che ripercorrono la traccia fornita dalle Linee Guida Nazionali

- l'esecuzione di analisi del suolo per la stima delle disponibilità dei macroelementi e degli altri principali parametri della fertilità, permettendo lo sviluppo di un piano di concimazione più preciso;
- la definizione dei quantitativi di macronutrienti distribuibili annualmente per coltura o per ciclo colturale, tramite un piano di fertilizzazione che tenga in considerazione le asportazioni colturali; in alternativa, il disciplinare mette a disposizione un modello semplificato, in cui, per ciascuna coltura, è rilasciata una scheda a dose standard. Per quanto riguarda l'apporto di microelementi, non sono segnalate limitazioni, ad eccezione del rame, il cui eventuale apporto concorre al raggiungimento del limite previsto per i prodotti fitosanitari;
- il rispetto dei quantitativi massimi distribuibili annualmente, così come stabiliti in applicazione della Direttiva 91/676/CEE;
- il frazionamento delle dosi di azoto, nel caso in cui si superino 100 kg N ha⁻¹ per le colture erbacee ed orticole e 60 kg N ha⁻¹ per le colture arboree;
- l'impiego preferenziale dei fertilizzanti organici.

Le Norme Tecniche di Produzione Integrata 2018 consentono di usufruire delle schede standard specifiche per ciascuna coltura, in alternativa alla formulazione del piano di concimazione. La dose standard va intesa come la dose di macroelemento da prendere come riferimento in condizioni ordinarie di resa produttiva, di fertilità del suolo e climatiche. Tuttavia, può essere modificata in base a condizioni ritenute eccezionali: sono possibili incrementi se si prevede una maggiore produzione, se il suolo presenta una scarsa dotazione di sostanza organica, se la coltura manifesta sintomi di carenze nutritive o fisiopatie, oppure nel caso il dilavamento da forti piogge nel periodo autunno-invernale è particolarmente pronunciato. Nelle condizioni diametralmente opposte a quelle appena elencate, si adoperano delle riduzioni alla dose standard.

Al fine di agevolare la stesura di un idoneo piano di concimazione, le Norme Tecniche di Regione Piemonte di Produzione Integrata 2018 forniscono un bilancio semplificato, riferito solo all'azoto, volto a calcolare gli apporti necessari, come di seguito riportato: (equazione 11)

$$Y * B = (kc * Fc) + (ko * Fo) + Nc \quad (11)$$

Il disciplinare specifica che l'equazione di cui sopra costituisce un bilancio in forma semplificata, il quale tuttavia può esser sostituito con una formula di maggior dettaglio, purchè giustificata.

6.4.2. Fabbisogni (Y * B)

Il fabbisogno dell'azoto viene determinato sulla base della produzione ordinaria, attesa oppure desunta dalla media produttiva aziendale degli ultimi tre anni (Y), moltiplicata per il coefficiente tabellare unitario di asportazione per singola coltura.

6.4.3. Disponibilità di N derivante da precessione colturale (Nc)

Il disciplinare regionale considera questa voce solo nel caso di rottura dei prati con leguminose di durata almeno biennale o nel caso di sovesci di leguminose. Si quantifica un apporto di azoto pari a 80 kg N ha⁻¹ nel caso di medicaie di almeno tre anni, 40 kg N ha⁻¹ nel caso di prati di trifoglio e 30 kg N ha⁻¹ in presenza di prati di leguminose e graminacee o di sovesci di leguminose.

6.4.4. Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza (Kc * Fc e Ko * Fo)

Gli apporti di azoto tramite concime minerale (Fc) e concime organico (Fo) sono accompagnati dai loro relativi coefficienti di efficienza, Kc e Fc. Se per i concimi di sintesi risulta facile la determinazione dell'efficienza, perchè pari al 100 %, per i concimi organici, assegnare un appropriato coefficiente di efficienza appare molto più complesso: è modulato in base al tipo di refluo, alla coltura, all'epoca ed alla modalità di distribuzione (Tabella 22). Nel caso di utilizzo di ammendanti compostati, quale il compost, si stima un'efficienza media pari al 30 %; mentre per le coltivazioni sommerse, come il riso, si considera un'efficienza media pari al 20 % vista la ridotta mineralizzazione in ambiente anaerobico.

Al fine di determinare la dose utile totale di P e K, il disciplinare definisce gli apporti necessari in funzione della dotazione naturale presente nel suolo. I suoli poveri o mediamente dotati possono ricevere una quota di mantenimento, pari alla quantità di elementi nutritivi derivante dagli asporti delle colture; tuttavia nel caso di ricorso alla sola concimazione organica, si possono apportare reflui fino al raggiungimento dei limiti di soglia previsti per l'azoto. Nel caso di suoli ricchi in fosforo e potassio, il disciplinare prevede la sospensione della fertilizzazione minerale sino a quando le analisi fisico-chimiche del suolo non confermino l'abbassamento della concentrazione dell'elemento nutritivo specifico, raggiungendo l'intervallo di dotazione media. Tuttavia, su esclusiva indicazione del tecnico, è consentito apportare un quantitativo massimo di 20 kg P₂O₅ ha⁻¹, estendibili a 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ in casi specifici per il mais, o 50 kg K₂O ha⁻¹, se si verifica uno dei seguenti casi:

- specifiche caratteristiche chimico-fisiche del terreno che comportano l'immobilizzazione dell'elemento nutritivo;
- necessità di raggiungere migliori standard qualitativi, ottenibili dalla maggior presenza di elemento nutritivo nel suolo;
- necessità di sopperire ad estreme condizioni climatiche che implicano l'allontanamento dell'elemento nutritivo, causando condizioni di carenza;
- per quanto riguarda il fosforo, situazioni di apporti localizzati alla semina per favorire l'effetto *starter* nelle fasi iniziali di crescita.

Per quanto concerne la fertilizzazione, il disciplinare attribuisce un'efficienza pari al 100 % per il fosforo ed il potassio, sia per i concimi minerali sia per quelli organici.

Tabella 22. Efficienza degli apporti di azoto organico in funzione del tipo di reflu, della coltura, dell'epoca e modalità di distribuzione

Coltura	Modalità di distribuzione	Epoca di distribuzione	Efficienza per materiali palabili*	Efficienza per materiali non palabili	
Coltura a ciclo autunno-vernino o autunno-primaverile, compresi erbai	Copertura con interrimento	Primavera		0,70	
	Copertura senza interrimento	Primavera	0,55	0,70	
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Primavera o estate	0,55	0,70	
	Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria, con interrimento	Estate		0,55	
	Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria, senza interrimento	Estate	0,55	0,30	
	Dopo la raccolta, in fertirrigazione sulla coltura secondaria	Estate		0,70	
	Dopo la raccolta, in presemina di una coltura secondaria	Estate	0,55	0,55	
	Dopo la raccolta, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie	Estate	0,55	0,30	
	Copertura con interrimento	Autunno		0,55	
	Copertura senza interrimento	Autunno	0,55	0,30	
	Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Autunno	0,50	0,65	
	Colture a ciclo primaverile-estivo o estivo, compresi erbai	Pre-aratura, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie	Primavera	0,70	0,70
		Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Primavera o estate	0,50	0,65
Copertura con interrimento		Estate		0,70	
Copertura senza interrimento		Estate	0,55	0,55	
Dopo la raccolta, in copertura sulla coltura secondaria		Autunno	0,55	0,30	
Dopo la raccolta, in presemina di una coltura secondaria		Autunno	0,55	0,55	
Dopo la raccolta, su suolo nudo, stocchi, stoppie o paglie		Autunno	0,55	0,30	
Distribuzione secondo criteri deroga Nitrati	Autunno	0,50	0,65		

*Per i materiali palabili, è compreso anche l'effetto fertilizzante attivo negli anni successivi a quello della distribuzione

6.5. Il piano di concimazione secondo il metodo di Masoni et al., 2017

Un ulteriore approccio preso in considerazione è stato fornito dal Prof. Alessandro Masoni, docente dell'Università di Pisa, illustrato sul libro *Agronomia*, a cura di

Ceccon, Fagnano, Grignani, Monti, Orlandini. In questa situazione, per la determinazione della dose ottimale, è stata definita una specifica equazione per ciascun macronutriente, come riportato nelle equazioni 12, 13, 14:

$$Q_N = F_N - (N_P + N_M + N_{CO}) + (N_L + N_V + N_D) \pm N_{CP} \quad (12)$$

$$Q_P = \frac{F_P - (P_{CP} + P_M)}{P_{DS}} \quad (13)$$

$$Q_K = F_K - K_{CP} + K_L \quad (14)$$

6.5.1. Fabbisogni (F_N , F_P , F_K)

Il fabbisogno di macronutriente della coltura non corrisponde solo al contenuto di azoto, fosforo e potassio del prodotto utile, ma alla sommatoria di azoto, fosforo e potassio presente in tutti gli organi che costituiscono la pianta. In linea generale, il fabbisogno della coltura si ricava dal prodotto tra la produzione di sostanza secca di ciascuna parte della pianta ed il suo relativo contenuto percentuale di macroelemento, desumibile da apposite tabelle.

6.5.2. Disponibilità di N derivante da apporti idrici (N_P)

La quantità di azoto proveniente da apporti idrici deriva da due flussi, attraverso le precipitazioni atmosferiche, quali pioggia, neve e grandine, e attraverso l'irrigazione; in entrambi i casi, viene calcolata con l'equazione 15:

$$N_P = H_p * [N_p] \quad (15)$$

in cui H_p è l'altezza degli apporti idrici espressa in mm e $[N_p]$ rappresenta la concentrazione media di N nelle precipitazioni o nell'acqua irrigua.

6.5.3. Disponibilità di N, P e K derivante da precessione colturale (N_{CP} , P_{CP} , K_{CP})

La quantità di azoto rilasciata nel terreno dai residui della coltura precedente, indipendentemente che sia ad elevato o ridotto rapporto C:N, viene definita con l'equazione 16:

$$N_{CP} = (N_Z - Z * k_1 * [N_{SO}]) * \frac{n}{12} \quad (16)$$

in cui N_Z è la quantità di N contenuta nei residui della coltura precedente (kg N ha^{-1}); Z è la quantità di residui lasciati dalla coltura precedente (t ss ha^{-1}); k_1 è il coefficiente isoumico, corrispondente alla frazione di humus ottenuto dai residui interrati e variabile tra il 15% per le graminacee e brassicacee, il 20% per il girasole, mais, sorgo, e il 25% per le leguminose; $[N_{SO}]$ è la concentrazione di N nell'humus, pari a 50 kg t^{-1} ; n è il numero dei mesi compreso tra l'interramento dei residui della coltura precedente e la raccolta della coltura attuale.

La quantità di fosforo rilasciata nel terreno dai residui della coltura precedente viene definita con un'equazione analoga a quella impiegata per la quantificazione dell'azoto:

$$P_{CP} = (P_Z - Z * k_1 * [P_{SO}]) * \frac{n}{12} \quad (17)$$

Invece, nel caso del potassio, considerando che l'ossido di potassio nell'humus è praticamente assente, la formula per il calcolo della quantità di K₂O lasciata o sottratta dai residui della coltura precedente è più semplice di quelle già descritte:

$$K_{CP} = Z * K_Z \quad (18)$$

6.5.4. Disponibilità di N derivante dalle fertilizzazioni organiche effettuate nell'anno precedente (N_{CO})

La quota di concime organico, più resistente e non decomposta nel primo anno, che va incontro a mineralizzazione, viene determinata con la seguente equazione 19:

$$N_{CO} = Q_{CO} * [N_{CO}] * k_{CO} \quad (19)$$

in cui Q_{CO} è la quantità di concime organico distribuito alla coltura precedente (t ha⁻¹), $[N_{CO}]$ è la concentrazione di N del concime organico e k_{CO} è il coefficiente di recupero dell'azoto da concimi organici, applicati alla coltura precedente, in funzione della frequenza di applicazione come riportato nella Tabella (23).

Tabella 23. Coefficiente di recupero (%) dell'azoto da fertilizzanti organici in base alla frequenza di applicazione

Effluente	Distribuzione			
	Annuale	Biennale	Triennale	Saltuaria
Letame, compost	50	30	20	20
Liquame bovino	30	15	10	
Liquame suino e pollina	15	10	5	

6.5.5. Disponibilità di N e P derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica (N_M, P_M)

Al fine di determinare la quota di azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica, "il metodo Masoni" propone una sua interpretazione, descritta nell'equazione 20:

$$N_M = N_T * \sum k_2m \quad (20)$$

in cui N_T è la quantità di azoto presente nel terreno (kg ha⁻¹), riferito ad una profondità di 30 cm, e $\sum k_2m$ è la sommatoria dei coefficienti mensili di mineralizzazione relativi al periodo considerato (%), variabili a seconda della temperatura e del contenuto di argilla e limo. Il coefficiente mensile di mineralizzazione viene calcolato mediante l'equazione 21:

$$k_2m = \frac{(T - 0,5) * 240}{\frac{([A] + 20) * (0,3 * [L] + 20)}{12}} * 0,5 \quad (21)$$

in cui T è la temperatura media del mese considerato, $[A]$ è il contenuto di argilla (%) e $[L]$ è il contenuto di limo nel terreno (%).

Analogamente all'azoto, la quantità di P₂O₅, mineralizzata durante un certo periodo dell'anno (P_M), si determina con le medesime relazioni, ma applicate per il fosforo:

$$P_M = P_{SO} * \sum k_2 m \quad (22)$$

in cui P_{SO} è il fosforo presente nella sostanza organica e $\sum k_2 m$ è la sommatoria dei coefficienti mensili di mineralizzazione,

$$k_2 m = \frac{(T - 0,5) * 240}{\frac{([A] + 20) * (0,3 * [L] + 20)}{12}} * 0,5 \quad (23)$$

6.5.6. Perdite di N e K per lisciviazione (N_L , K_L)

Il metodo proposto per la stima della lisciviazione dell'azoto suggerisce di suddividere l'anno in tre periodi differenti. Il periodo compreso tra ottobre e febbraio, in cui peraltro si concentra la quasi totalità della lisciviazione, viene calcolato mediante l'equazione (24):

$$N_L = N_{PL} * \frac{k_L}{100} \quad (24)$$

in cui N_{PL} è la quantità di azoto potenzialmente lisciviabile (kg ha^{-1}), definito dalla quota di azoto nitrico proveniente dalla mineralizzazione della sostanza organica, dai residui colturali e dalle precipitazioni; k_L è il coefficiente di lisciviazione che varia a seconda dell'entità delle piogge (mm) tra ottobre e febbraio e della tessitura del suolo. Il secondo periodo comprende i mesi di marzo e aprile, in cui le perdite di azoto per lisciviazione sono comprese tra zero con piogge < 100 mm e 10 kg ha^{-1} con piogge superiori a 200 mm. Le perdite per lisciviazione nei restanti mesi sono pari a zero, in quanto si considera che l'evapotraspirazione sia superiore alle piogge. Per quanto riguarda il potassio, la lisciviazione è determinata analogamente all'azoto:

$$K_L = K_{PL} * \frac{k_L}{100} \quad (25)$$

in cui K_{PL} è la quantità di ossido di potassio potenzialmente lisciviabile (kg ha^{-1}), determinato in funzione della quantità di K_2O contenuta nel terreno e la percentuale di K_2O solubile rispetto al totale, e k_L è il coefficiente di lisciviazione.

6.5.7. Perdite di N per denitrificazione (N_D) e per volatilizzazione (N_V)

Le perdite di azoto annuali a seguito di denitrificazione (N_D) non risultano consistenti, quasi trascurabili, raggiungendo 5 kg N ha^{-1} ; l'unica reale eccezione è rappresentata dal riso coltivato in sommersione, le cui perdite per denitrificazione possono spingersi fino a 50 kg N ha^{-1} .

Le perdite di azoto per volatilizzazione (N_V) risultano essere molto variabili, ammontando anche fino al 40% dell'azoto distribuito. Benchè abbia introdotto questa voce, "il metodo Masoni" non la inserisce esplicitamente nel calcolo del piano di concimazione.

6.5.8. Apporto dei fertilizzanti e relativa efficienza

Una volta determinata la quantità di nutrienti che è necessario apportare, occorre definire l'efficienza, la quale varia a seconda dell'elemento nutritivo considerato: per il fosforo ed il potassio, l'efficienza è pari al 100%, per l'azoto derivante da concimi di sintesi è pari al 60%, mentre per l'azoto che deriva dai concimi organici, la quota

efficiente varia a seconda del tipo di refluo, anche se non tiene conto se il materiale sia palabile o meno, della dose distribuita e della tessitura del terreno, come rappresentato nella Tabella (24):

Tabella 24. Efficienza agronomica apparente dell'azoto di alcuni concimi organici

Terreno	Dose di effluente (kg N ha ⁻¹)	Efficienza agronomica apparente (%)		
		Bovino	Suino	Avicolo
Sabbioso	<125	30-67	35-79	40-91
	125-250	28-62	33-73	38-84
	>250	25-57	29-67	33-77
Franco	<125	28-60	33-71	38-82
	125-250	26-55	31-65	36-75
	>250	24-49	28-58	32-67
Argilloso	<125	25-54	29-63	33-72
	125-250	24-48	28-57	32-66
	>250	21-43	27-50	29-58

6.6. Confronto tra i metodi, elementi di novità

Nel seguente capitolo si pongono a confronto i metodi proposti nei paragrafi precedenti. Per agevolare la lettura è stato presentato un caso studio che calcola il bilancio dell'azoto su mais (Tabella 25).

Per quanto riguarda il calcolo degli asporti e della deposizione atmosferica, non si evidenziano differenze sostanziali. Il discorso è analogo per il calcolo dell'azoto proveniente dai residui colturali. È l'azoto mineralizzato a determinare le maggiori discrepanze, soprattutto se si analizza il metodo Masoni *et al.* (2017), il cui valore 183 kg N ha⁻¹ sembra essere eccessivo. La determinazione di un valore così estremo è dovuto dal fatto che viene considerata la mineralizzazione dei mesi tra la raccolta della coltura precedente sino alla raccolta della coltura in atto: essendo il mais la coltura coltivata in precedenza, sono stati conteggiati 12 mesi. Ci fosse stato il frumento, il valore avrebbe toccato un picco di 244 kg N ha⁻¹, mentre con il mais di secondo raccolto si sarebbe ridotto fino a 91,5 kg N ha⁻¹: qualunque fosse il caso preso in considerazione, alla luce dei calcoli sembrano valori comunque eccessivi. Ad esclusione delle Norme Tecniche, le quali non la considerano proprio, la mineralizzazione per gli altri tre metodi assume valori simili, nonostante siano presi in valutazioni parametri diversi.

La variabile a provocare delle differenze per l'azoto proveniente dalle fertilizzazioni organiche precedenti è il coefficiente di recupero pari a 0,5 per il metodo Masoni *et al.* (2017) e per le Linee Guida, mentre si riduce a 0,3 per il D.M. 5046/2016.

Le perdite per lisciviazione, volatilizzazione ed immobilizzazione, considerate solo dalle Linee Guida da Masoni *et al.* (2017), non riportano particolari discrepanze.

Per quanto riguarda le concimazioni minerali azotate efficienti, le quattro fonti normative si allineano sullo stesso fronte, attribuendo un coefficiente di efficienza pari a 1. Masoni *et al.* (2017) attribuiscono di *default* un'efficienza pari a 0,6: è una novità rispetto alla linea seguita sino ad oggi, tuttavia appare ancora un valore grezzo, in quanto non è modulabile a seconda dell'epoca e della modalità di distribuzione.

Tabella 25. Confronto applicativo tra i metodi descritti in precedenza impiegando come coltura di paragone una pianta di mais su terreno sabbioso

Voci del bilancio	Linee Guida Nazionali Produzione Integrata	Norme Tecniche Produzione Integrata Piemonte	D.M. 5046/2016	10 R/2007	Ceccon <i>et al.</i> , 2017
Asporti unitari (kg N ha ⁻¹)	250	240	250	240	237
Concimazione organica efficiente (kg N ha ⁻¹)	82	144	82	144	99
Concimazione minerale efficiente (kg N ha ⁻¹)	163	163	163	163	98
N mineralizzato (kg N ha ⁻¹)	83	-	60	65	183
N residui precessione (kg N ha ⁻¹)	-40	0	-40	-40	-21
Deposizione atmosferica (kg N ha ⁻¹)	15	-	20	20	15
N da fertilizzazioni organiche precedenti (kg N ha ⁻¹)	100	-	62	-	100
N lisciviato (kg N ha ⁻¹)	35	-	-	-	46
N immobilizzato e volatilizzato (kg N ha ⁻¹)	21	-	-	-	5
Surplus/deficit (kg N ha⁻¹)	97	67	97	112	186

Per l'azoto organico efficiente apportato, si vede apparentemente la contrapposizione di due sottogruppi: da un lato le norme nazionali e Masoni *et al.*, (2017), dall'altro le norme regionali. In realtà queste ultime includono al loro interno anche il coefficiente di recupero e quindi si spiegano i 62 kg di differenza tra le norme nazionali e regionali.

Se si valutano i surplus ottenuti, si evidenziano delle differenze di non poco conto:

- le Linee Guida, il D.M. 5046/2016 ed il 10/R/2007 stimano un surplus compreso tra 97 e 112 kg N ha⁻¹;
- le Norme Tecniche stimano un surplus di circa 67 kg N ha⁻¹;
- il metodo Masoni *et al.*, (2017) stima un surplus pari a 186 kg N ha⁻¹.

È necessario sottolineare che il surplus elevato ottenuto dal metodo Masoni *et al.*, (2017) è da attribuire all'eccessiva mineralizzazione stimata. Invece, il metodo proposto dalle Norme Tecniche è molto superficiale e grezzo, in quanto non considera molte delle voci degli apporti naturali.

7. I Sistemi di Supporto alle Decisioni (SSD) in agricoltura

L'attività agricola, intesa solo come attività di campo, consiste in una moltitudine di pratiche, volte oramai a favorire da un lato la produzione, dall'altro l'impostazione di un modello di sviluppo caratterizzato da un ridotto impatto ambientale (Perini e Susi, 2004). Quindi, ad esempio, l'applicazione di determinate pratiche nella gestione delle malattie delle piante da parte di coltivatori e agronomi richiede abilità specifiche, come dati storici e informazioni sulla malattia, nonché su sostanze chimiche e tecniche a basso impatto, che possono essere sfruttate per ridurre al minimo o evitare danni al prodotto e alle piante. Queste fonti di informazione sono distribuite tra i diversi attori nel sistema di produzione agricola (Perini e Susi, 2004). Pertanto, i sistemi di supporto alle decisioni (SSD) sono efficaci, in quanto integrano tutte le informazioni e i dati in sistemi di informazione, tenendo conto dei diversi ruoli che possono essere coperti dai propri utenti nei sistemi di produzione (Perini e Susi, 2004). Un SSD è un sistema interattivo pensato per aiutare gli utilizzatori, al fine di identificare e risolvere i problemi, quindi completare ed integrare il processo decisionale compiuto dall'agricoltore (Power, 1997). Gli algoritmi per SSD basati su modelli computazionali (*expert system modeling*) sono formulati utilizzando relazioni standardizzate tra parametri dipendenti e indipendenti (Karmakar *et al.*, 2010).

Molteplici sono gli esempi di sviluppo e applicazione dei SSD disponibili in agricoltura specifici per ciascun indirizzo, come:

- la gestione dei parassiti (Riparbelli *et al.*, 2008);
- la gestione delle risorse idriche (Fassio *et al.*, 2005, Acutis *et al.*, 2010);
- la gestione dei terreni agricoli (Mazzocchi *et al.*, 2013);
- la gestione dei nutrienti (Karmakar *et al.*, 2010).

Ai fini di questa tesi sarà presentato un *focus* su quattro importanti SSD volti alla gestione dei nutrienti.

7.1. I SSD per la gestione dei nutrienti dei fertilizzanti minerali: *Yara CheckIT*

“*Yara CheckIT*” è un'applicazione gratuita messa a disposizione da Yara in grado di determinare le carenze nutrizionali delle colture in campo. L'applicazione è costituita da una raccolta di immagini che ritraggono i sintomi delle carenze nutritive specifiche per ogni coltura. L'agricoltore in campo può confrontare questa raccolta di immagini con i sintomi osservati sulla coltura, usufruendo anche di alcuni filtri di ricerca, come la coltura in questione, la morfologia e la posizione del sintomo sulla pianta, in maniera tale da accelerare il riconoscimento del sintomo. Una volta stabilita la causa della carenza, il *software* restituisce ulteriori informazioni su come la carenza incida sulla coltura, quali suoli possono portare a tale carenza e quali fattori aggravano una carenza. *CheckIt* fornisce un consiglio di concimazione per trattare la carenza identificata, o per prevenirla nella successiva stagione di crescita. L'applicazione è personalizzata per coltura e per paese. *CheckIt* consente agli agricoltori di fare un'analisi delle carenze direttamente in campo, e fornisce un consiglio nutrizionale per aiutarli a migliorare la qualità delle colture ed aumentare la resa. L'enorme semplicità di utilizzo, rende *Yara CheckIT* uno strumento molto maneggevole e pratico. Tuttavia, è sempre viva la possibilità di imbattersi in errori da parte dell'agricoltore durante il riconoscimento del sintomo.

7.2. I SSD per la gestione dei nutrienti dei reflui zootecnici

Come recensito da Karmakar *et al.* (2007), sono già disponibili molti SSD per la gestione dei reflui zootecnici, tuttavia la maggior parte di essi sono indirizzati alla sola pianificazione agronomica e gestione dei nutrienti in campo. Solo pochi SSD considerano la gestione globale dei reflui zootecnici all'interno dell'azienda, dalla produzione all'applicazione del refluo sul terreno (Acutis *et al.*, 2014). Tra questi, Karmakar *et al.* (2010) hanno sviluppato un SSD specifico per le aziende suinicole per le condizioni pedoclimatiche della provincia dell'Ontario. Allo stesso modo, Sørensen *et al.* (2003) hanno sviluppato un modello per valutare diversi sistemi di gestione dei reflui per allevamenti di suini e di vacche da latte. Anche Acutis *et al.* (2014) hanno proposto un proprio SSD volto alla corretta gestione degli effluenti nelle aziende zootecniche.

7.2.1. Integrated Swine Manure Management

Sempre un numero maggiore di SSD sta diventando necessario per supportare nella valutazione di diverse alternative di gestione degli effluenti zootecnici basate sulle combinazioni delle diverse fasi di gestione del refluo, come la raccolta, lo stoccaggio e la distribuzione. Per affrontare questa situazione, un programma informatico *user-friendly*, denominato *Integrated Swine Manure Management* (ISMM), è stato sviluppato per l'areale dell'Ontario (Karmakar *et al.*, 2010). Per la selezione, la progettazione e il funzionamento del SSD si prendono in considerazione criteri decisionali che includono le emissioni ambientali, le pratiche agronomiche ed i fattori sociali sanitari ed economici (Karmakar *et al.*, 2010). Il *software* considera la relazione tra l'acqua nel suolo e le condizioni climatiche prevalenti nell'areale. Il programma è interattivo, in modo che i fattori di ponderazione per i diversi criteri decisionali possano essere variati per soddisfare considerazioni specifiche del sito. Il programma richiede all'interno del suo applicativo *input* puntuali, come:

- informazioni su animali, stalle e mangimi;
- informazioni specifiche relative alla struttura di stoccaggio, colture e precedenti fonti di nutrienti;
- fattori di costo (Karmakar *et al.*, 2010).

L'utente può generare rapidamente molti scenari differenti, scegliendo le opzioni dal modulo di gestione specifico (Karmakar *et al.*, 2010). L'output del programma include informazioni circa:

- specifiche di produzione e stoccaggio del letame;
- equilibrio di nutrienti e applicazione sul campo;
- analisi economica;
- emissioni di gas serra;
- valutazione dei sistemi.

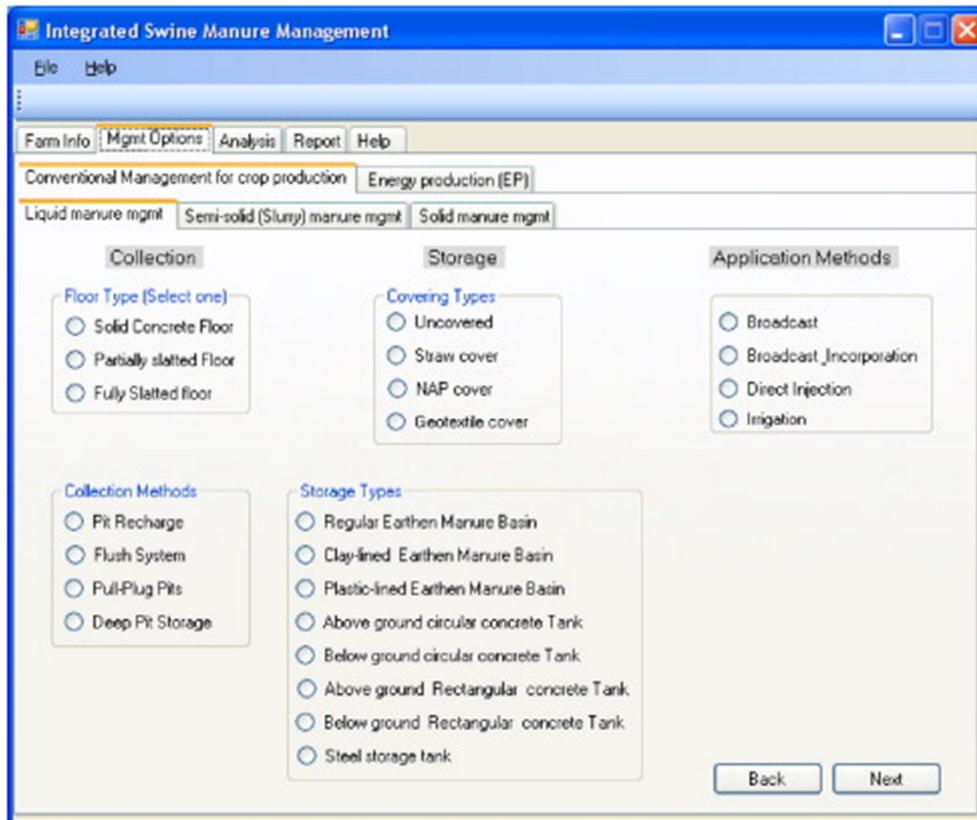


Figura 7. ISMM (Karmakar *et al.*, 2010)

La Figura 7 propone una rappresentazione dell'interfaccia così come viene vista e gestita dall'agricoltore, mettendo in evidenza la semplicità e la rapidità con cui l'agricoltore può usare l'applicazione.

7.2.2. MANNER-NPK

MANNER-NPK (*MANURE Nutrient Evaluation Routine*) è uno strumento di supporto alle decisioni sviluppato in Gran Bretagna in grado di quantificare la disponibilità di nutrienti nel refluo zootecnico (Nicholson *et al.*, 2013). In principio, MANNER-NPK è stato sviluppato per predire la disponibilità di azoto a seguito di uno spandimento in campo, tenendo conto delle analisi chimiche effettuate sul refluo. L'ultima versione del modello informatico include alcune funzioni che sono in grado di considerare i processi di trasformazione e di perdita dell'azoto e di quantificare la volatilizzazione dell'ammoniaca, la lisciviazione dei nitrati ed il rilascio di protossido di azoto in atmosfera. Inoltre, sono state apportate anche alcune modifiche circa la relazione tra i moduli per rappresentare meglio il flusso dell'azoto e le trasformazioni che si verificano in seguito all'applicazione del refluo in campo (Nicholson *et al.*, 2013). Fornisce una stima della disponibilità di azoto nel suolo ottenuto dalla mineralizzazione. Il *software* stima anche il contenuto nel refluo di fosforo, potassio, zolfo e magnesio (Nicholson *et al.*, 2013).

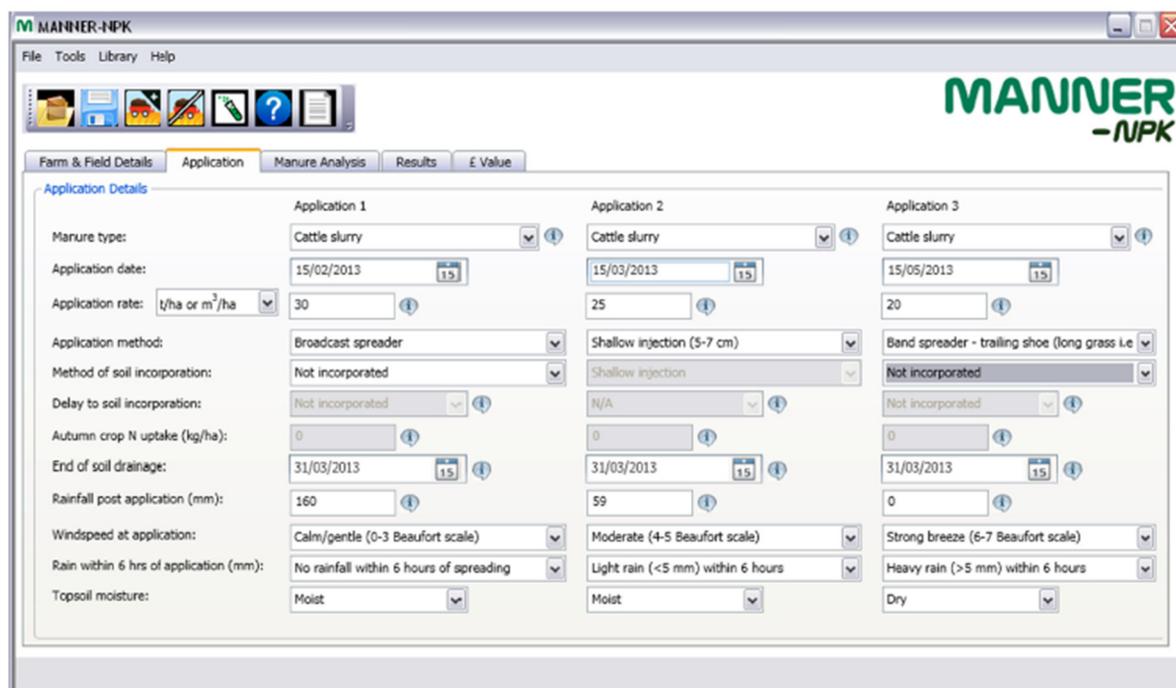


Figura 8. Screenshot MANNER-NPK

La Figura 8 rappresenta l'interfaccia con cui si presenta all'agricoltore, rappresentando una specie di registro delle fertilizzazioni: è evidente come risulti esser più specifico rispetto al modello descritto precedentemente.

7.2.3. ValorE

ValorE (Valorisation of Effluents) è un *software user-friendly* sviluppato in Lombardia per far fronte a diversi tipi di specie animale, ad esempio bovini, suini, pollame, ovini, caprini e cavalli, e per suggerire ed analizzare opzioni alternative di gestione dei reflui su scala aziendale e territoriale. Tale SSD è costituito da tre componenti principali:

- un sottosistema di gestione dati;
- un sottosistema di gestione modelli;
- un'interfaccia utente.

Una semplice rappresentazione della struttura SSD è riportata in Figura 9.

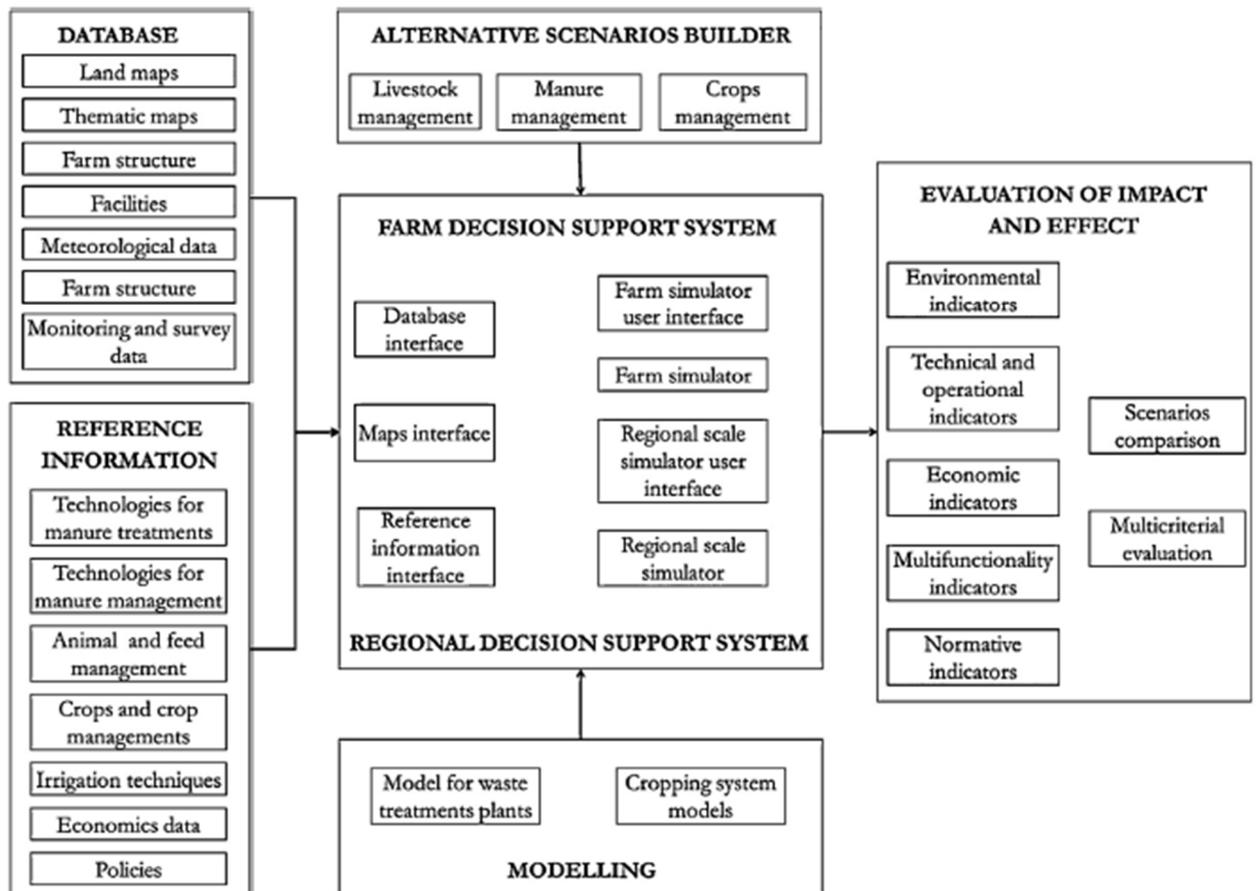


Figura 9. Schema della struttura di ValorE (Acutis *et al.*, 2014)

Per il calcolo della gestione dei reflui zootecnici, il *software* valuta:

- il volume finale del liquame immagazzinato;
- la composizione chimica e fisica finale;
- la frazione solida e liquida;
- le perdite gassose nell'atmosfera;
- la possibile produzione di biogas.

Inoltre, un modello informatico simula la crescita delle colture, il fabbisogno di acqua e la dinamica dell'azoto in diverse condizioni climatiche e con diverse pratiche di gestione. Si tratta di un modello di simulazione sviluppato specificamente sulla base di dati sul campo (Acutis *et al.*, 2014).

L'utente può generare rapidamente diversi scenari alternativi, scegliendo opzioni relative ai sistemi di stabulazione, alle strutture di stoccaggio, al trattamento del concime e ai metodi di applicazione al terreno e modificando le rotazioni delle colture. La valutazione degli scenari attuali e alternativi e il loro confronto sono calcolati attraverso diversi indicatori (Acutis *et al.*, 2014). Possono essere considerati come una rappresentazione sintetica delle conseguenze sugli aspetti tecnici, agronomici, ambientali, energetici, sociali ed economici portati dall'adozione di un particolare *management*. La maggior parte di questi indicatori è quantitativa, tuttavia alcuni di essi sono espressi in scala qualitativa come cattiva, giusta, buona, eccellente (Acutis *et al.*, 2014).

8. Materiali e metodi

8.1. Raccolta dati

8.1.1. Descrizione delle aziende coinvolte

Il progetto Monitro descritto precedentemente prevede il coinvolgimento di un numero rappresentativo di aziende in Piemonte per ciascuna tipologia: cerealicola, zootecnica, frutticola ed orticola. Questa tesi si concentrerà nello specifico sulle aziende cerealicole e zootecniche. Parte delle aziende hanno aderito al progetto mediante la partecipazione ad alcuni convegni, altre sono state coinvolte tramite le associazioni di categoria e attraverso le collaborazioni alla didattica; rilasciando il loro recapito telefonico, sono stati successivamente contattati ed intervistati in azienda.

8.1.2. L'origine dei dati e redazione dell'intervista

L'origine dei dati che ha permesso il calcolo è:

- l'agricoltore per quanto riguarda la ripartizione e le produzioni colturali, le strategie di concimazione, l'analisi chimico-fisica dei suoli e l'eventuale analisi dei reflui zootecnici;
- il 10/R/2007 per quanto riguarda le produzioni annuali e l'eventuale composizione chimica degli effluenti;
- diverse fonti (Grignani *et al.*, 2016; Ceccon *et al.*, 2017; Norme Tecniche di Produzione Integrata della Regione Piemonte 2018) per quanto riguarda la composizione chimica delle colture;
- la Banca Dati dei Suoli della Regione Piemonte, qualora l'agricoltore non avesse avuto a disposizione le analisi dei suoli.

Per la raccolta dei dati, è stata necessaria la redazione di un'intervista, strutturata come presentato nella Figura 10.

Le interviste aziendali sono state effettuate tra la fine del 2017 ed il 2018. In totale sono state intervistate 41 aziende, di cui 10 cerealicole e 31 zootecniche.



Figura 10. Schema dell'intervista sottoposta agli agricoltori

8.2. Sviluppo di un nuovo approccio per il piano di concimazione

Impiegando come base di partenza le fonti normative e bibliografiche descritte nel Capitolo 6, si è sentito il bisogno di sviluppare un nuovo approccio, pur rispettando i vincoli imposti dalle norme stesse. La volontà è stata quella di conservare le medesime voci che compongono il piano di concimazione, cercando di mantenere un filo conduttore con le normative descritte precedentemente. Tuttavia, la logica seguita per la definizione delle singole voci è in qualche modo più moderna, perché sono state introdotte con criterio nozioni teoriche già pur presenti, ma mai pienamente applicate. L'intenzione è stata quella di smontare l'impalcatura con cui tradizionalmente venivano definite le voci del bilancio per ricostruirle, inserendo dati bibliografici più aggiornati. La duttilità dello strumento permette di essere adottato per qualsiasi azienda, cerealicola, zootecnica, frutticola ed orticola.

Fino ad oggi, il nuovo approccio è stato sviluppato su un file Excel, in grado di fornire il piano di concimazione e gli indicatori aziendali, una volta inseriti alcuni dati.

Di seguito viene riportato in dettaglio la descrizione di ogni singola voce inserita nel nuovo piano di concimazione.

8.3. Voci del nuovo bilancio

Di seguito vengono descritte le voci che costituiscono il nuovo bilancio dei nutrienti.

8.3.1. Assorbimento della coltura

Anziché parlare solo di asporti culturali è stata introdotto il concetto di assorbimento. La coltura assorbe elementi nutritivi non solo per restituire il prodotto utile ai fini commerciali o aziendali, ma anche per svilupparsi: sono stati inclusi all'interno della voce anche gli elementi assorbiti per la costruzione dell'impalcatura della pianta, ad esempio gli stocchi per il mais e le paglie per il frumento. L'assorbimento colturale (kg N ha^{-1}) è stato calcolato:

$$Y = P_P * E_P + P_S * E_S \quad (26)$$

in cui P_P è la produzione primaria e P_S e la produzione secondaria della coltura considerata ($t \text{ ss ha}^{-1}$): sono valori dichiarati dall'agricoltore sulla base della produzione dell'anno precedente. E_P ed E_S rappresentano la concentrazione dell'elemento nutritivo (‰) rispettivamente in P_P e P_S : i valori sono stati reperiti da studi recenti (Ceccon *et al.*, 2017; Grignani *et al.*, 2016).

8.3.2. Mineralizzazione della sostanza organica

Per la mineralizzazione della sostanza organica, è stato adottato l'approccio proposto dalle Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018 (vedasi Tabella 13, capitolo 6.3.4).

8.3.3. Apporti di elementi nutritivi dai residui della precessione colturale

Gli apporti di elementi nutritivi ($\text{kg elemento nutritivo ha}^{-1}$) provenienti dai residui interrati della precessione colturali si calcolano come riportato nell'equazione 27:

$$E_{CP} = P_{CP} * [E_{CP}] * k_t \quad (27)$$

in cui P_{CP} è la produzione dei residui colturali della coltura precedente interrati, $[E_{CP}]$ è la concentrazione dell'elemento nutritivo nei residui (‰) e k_t è il coefficiente tempo della coltura in atto. È stato stabilito che la matrice interrata, qualunque essa sia e indipendentemente dal rapporto C:N, renderà disponibili tutti i propri elementi nutritivi entro l'anno: è considerata sempre una voce che apporta elementi nutritivi. Se il residuo interrato è dotato di un elevato rapporto C:N, si consiglia di effettuare una concimazione azotata anticipata, in modo tale da impedire che si presentino fenomeni di carenza da azoto nella prima fase di sviluppo.

8.3.4. Apporti elementi nutritivi dalle concimazioni organiche dell'anno precedente

Si considerano gli apporti di elementi nutritivi, attribuibili alle concimazioni organiche dell'anno precedente, solo se si fa ricorso ad ammendanti, quali il letame, il compost e la frazione solida del digestato, mentre si considera nullo l'effetto residuo rilasciato da liquame e pollina. L'effetto residuo dell'ammendante si calcola come riportato nell'equazione 28:

$$M_F = A_A * [N] * k \quad (28)$$

in cui A_A è l'apporto di ammendante distribuito l'anno precedente ($t \text{ t.q. ha}^{-1}$), $[N]$ è la concentrazione di azoto dell'ammendante (‰) e k è il coefficiente di recupero pari a 0,3. Si valuta l'effetto residuo solamente se l'apporto del letame o del compost è saltuario ed effettuato l'anno precedente, in quanto, se la distribuzione è annuale, k si integra direttamente all'efficienza della concimazione organica dell'anno.

8.3.5. Deposizioni atmosferiche

Le deposizioni atmosferiche (D_A) che ricadono sul suolo sono pari a $30 \text{ kg N ha anno}^{-1}$. È necessario relazionarle al k_t della coltura in atto.

8.3.6. Azotofissazione

La stima dell'azotofissazione fa riferimento al testo Grignani (2016) e i valori medi di azotofissazione sono riportati in Figura 11:

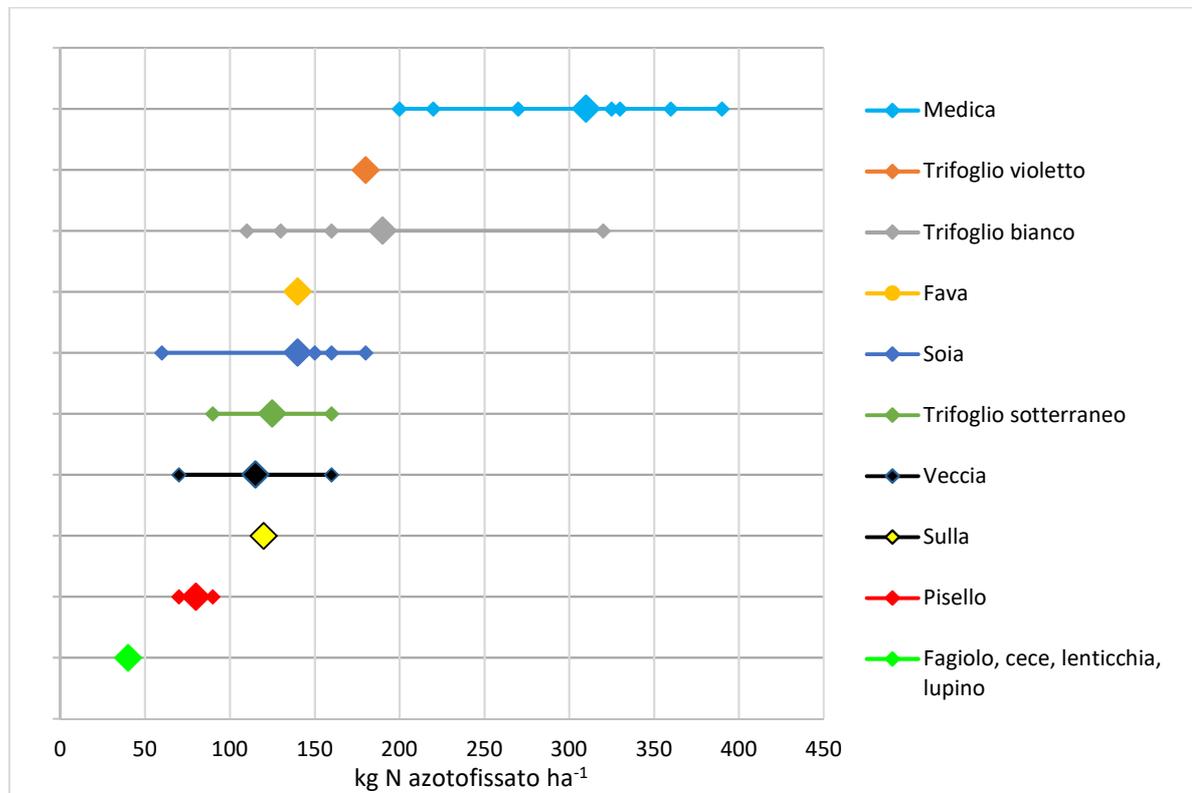


Figura 11. Azotofissazione annuale delle principali leguminose coltivate (Grignani, 2016)

Qualora l'azotofissazione superasse i fabbisogni della coltura, questo approccio ne prevede una riduzione fino al pareggio con i fabbisogni stessi.

8.3.7. Apporti

Gli apporti necessari a soddisfare i fabbisogni colturali si calcolano con l'equazione 29:

$$A_M + A_O = Y - (E_{CP} + M_F + D_A + B_{FX}) \quad (29)$$

in cui A_M e A_O sono rispettivamente gli apporti minerali e gli apporti organici. Per quanto riguarda il fosforo ed il potassio, i fabbisogni colturali sono messi in relazione alla loro dotazione nel suolo ed alla tessitura, pertanto sono stati delineati dei coefficienti di riduzione volti a riportare alla condizione di media dotazione il fosforo ed il potassio del terreno (Tabella 26 e 27).

Tabella 26. Coefficiente di riduzione di apporto di P in relazione alla tessitura e dotazione del terreno

Tendenzialmente sabbiosa	Tessitura*		Dotazione ppm P	Coefficiente
	Franca	Tendenzialmente argillosa		
<5	<8	<5	Scarsa	1
5-10	8-11	5-9	Bassa	1
10-15	11-15	9-11	Media	0,75
15-30	15-25	11-20	Elevata	0,5
>30	>25	>20	Molto elevata	0

*Le suddivisioni fanno riferimento alle categorie individuate dalle Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018

Tabella 27. Coefficiente di riduzione di apporto di K in relazione alla tessitura e dotazione del terreno

Tendenzialmente sabbiosa	Tessitura*		Dotazione ppm K	Coefficiente
	Franca	Tendenzialmente argillosa		
<40	<60	<80	Scarsa	1
40-80	60-100	80-120	Bassa	0,75
80-120	100-150	120-180	Media	0,5
>120	>150	>180	Elevata	0

*Le suddivisioni fanno riferimento alle categorie individuate dalle Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018

8.3.7.1. Apporti organici

Per quanto riguarda gli apporti organici, sono state definite tre classi di efficienza, alta, media e bassa, a seconda della modalità ed epoca di distribuzione. Inoltre, è stato attribuito un coefficiente di efficienza dell'azoto in funzione della matrice organica impiegata (Tabella 28): per il fosforo ed il potassio, l'efficienza è sempre pari ad 1.

Come si può osservare dalla tabella, alla matrice palabile è stato assegnato un coefficiente pari a:

- 0,35, nel caso in cui l'efficienza sia bassa;
- 0,4, nel caso in cui l'efficienza sia media;
- 0,45, nel caso in cui l'efficienza sia alta.

Questo vuol dire che, alla luce di quanto spiegato precedentemente, se fosse distribuito del letame annualmente, il coefficiente totale sarebbe:

- 0,65, nel caso in cui l'efficienza fosse bassa;
- 0,7, nel caso in cui l'efficienza fosse media;
- 0,75, nel caso in cui l'efficienza fosse alta.

Tabella 28. Coefficiente di efficienza dell'azoto in base all'epoca e modalità di distribuzione per letame, liquame, digestato e compost

Modalità di distribuzione	Epoca	Eff.	Pollina	Liquame		Letame		Digestato	Compost
				suino	bovino	suino	bovino		
Pre-aratura primaverile	feb-giu	alta	0,75	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,45
Pre-aratura estiva o autunnale su paglie o stocchi	lug-nov	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4
Pre-aratura estiva o autunnale su terreno nudo o stoppie	lug-nov	bassa	0,36	0,31	0,26	0,35	0,35	0,26	0,35
Copertura su colture primaverili con interrimento	feb-giu	alta	0,75	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,45
Copertura su colture primaverili senza interrimento	feb-giu	bassa	0,36	0,31	0,26	0,35	0,35	0,26	0,35
Pre-aratura estiva su paglie o stocchi	lug-nov	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4
Pre-aratura estiva - su terreno nudo o stoppie	lug-nov	bassa	0,36	0,31	0,26	0,35	0,35	0,26	0,35
Copertura ripresa vegetativa su cereali vernini	feb-giu	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4
Colture 2° raccolto preparazione del terreno	lug-nov	alta	0,75	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,45
colture 2° raccolto in copertura con interrimento	lug-nov	alta	0,75	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,45
colture 2° raccolto in copertura senza interrimento	lug-nov	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4
Pre-aratura su prati o medicai su paglie o stocchi	lug-nov	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4
Pre-aratura su prati o medicai su terreno nudo o stoppie	lug-nov	bassa	0,36	0,31	0,26	0,35	0,35	0,26	0,35
Su prati o medicai dopo i tagli con interrimento	feb-giu	alta	0,75	0,65	0,55	0,45	0,45	0,55	0,45
Su prati o medicai dopo i tagli senza interrimento	feb-giu	media	0,55	0,48	0,41	0,4	0,4	0,41	0,4

Per quanto riguarda la matrice non palabile, è stato attribuito un coefficiente di efficienza in base:

- all'epoca di distribuzione;
- alla presenza o meno delle stoppie o stocchi;
- al ricorso o meno dell'interrimento.

Pertanto il coefficiente varia da 0,65, per il liquame suino interrato in presenza di colture sarchiate, fino a 0,26, se viene applicato il liquame bovino su terreno nudo e senza il ricorso all'interrimento.

8.3.7.2. Apporti minerali

Nel nuovo bilancio, gli apporti con concime minerale non sono caratterizzati da alcun elemento di novità. A ciascuna modalità ed epoca di distribuzione è stata assegnata una classe di efficienza, la cui funzione principale è di indicare all'agricoltore quanto sia idonea o meno la pratica attuata (Tabella 29). A livello operativo la suddivisione in classi di efficienza non comporta alcuna differenza, in quanto rappresenta solo un monito all'agricoltore, evidenziando quali sono le pratiche e modalità di distribuzione più idonee. Sono stati introdotti dei coefficienti di efficienza all'azoto, fosforo e potassio che vengono distribuiti pari a:

- 0,9 per l'azoto, in quanto si assiste a perdite inevitabili per lisciviazione e volatilizzazione;
- 1 per il fosforo ed il potassio.

Tabella 29. Classe di efficienza in funzione all'epoca e modalità di distribuzione dei concimi minerali

Epoca e modalità di distribuzione dei concimi minerali	Classe di efficienza
Anno precedente alla semina a spaglio	Bassa
Pre-semina a spaglio	Media
Localizzato alla semina	Alta
Accestimento a spaglio	Alta
Levata a spaglio	Media
Spigatura a spaglio	Alta
Copertura	Alta
Levata a spaglio e successiva rincalzatura	Media
Levata localizzato abbinato a rincalzatura	Alta
Fogliare	Alta
Fertirrigazione	Alta

8.4. Indicatori aziendali

Sono stati introdotti alcuni indicatori aziendali in grado di descrivere la *performance* aziendale dal punto di vista dell'efficienza ambientale ed economica.

8.4.1. Surplus (+) o deficit (-) medio aziendale

L'indicatore surplus (+) deficit (-) medio aziendale ha la finalità di restituire un output in grado di evidenziare se le concimazioni attuate impoveriscono o arricchiscono il terreno. Mette a confronto:

- l'assorbimento colturale totale di azoto, fosforo e potassio, non considerando il fabbisogno della pianta che dipende dalla dotazione dell'elemento nutritivo del terreno;
- i quantitativi totali di concime minerale ed organico impiegati, non tenendo conto dei tempi e delle modalità di distribuzione: è sottintesa un'efficienza pari a 1;
- i processi, come la deposizione atmosferica e l'azotofissazione, che aggiungono nel suolo un apporto di elemento nutritivo, escludendo pertanto la mineralizzazione (l'azoto minerale è già presente nel terreno sotto forma organica).

Essendo un indicatore su scala aziendale, viene operata una media ponderata sia per i fabbisogni colturali sia per le concimazioni. In seguito, i dati ottenuti vengono confrontati con analoghi indicatori di aziende appartenenti alla medesima categoria.

8.4.2. Perdite di azoto per lisciviazione

L'indicatore fornisce una stima della lisciviazione dell'azoto. L'indicatore è direttamente collegato al surplus o deficit medio aziendale. Nel solo caso del surplus viene applicata l'equazione 30:

$$L = S * k_T * k_C \quad (30)$$

in cui L è la lisciviazione (kg N ha⁻¹). S è il surplus (kg N ha⁻¹) calcolato con l'indicatore descritto precedentemente. k_T è un coefficiente legato alla tessitura tessitura pari a:

- 0,2 per i terreni tendenzialmente argillosi;

- 0,3 per i terreni franchi;
- 0,4 per i terreni tendenzialmente sabbiosi.

I criteri di classificazione dei suoli fanno riferimento alle Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018.

k_C è un coefficiente che considera sia la piovosità sia la coltura in atto: tiene conto dell'entità delle piogge nel periodo compreso tra ottobre e febbraio, considerando anche se sul terreno sono presenti colture autunno-vernine, primaverili-estive o permanenti (Figura 12):

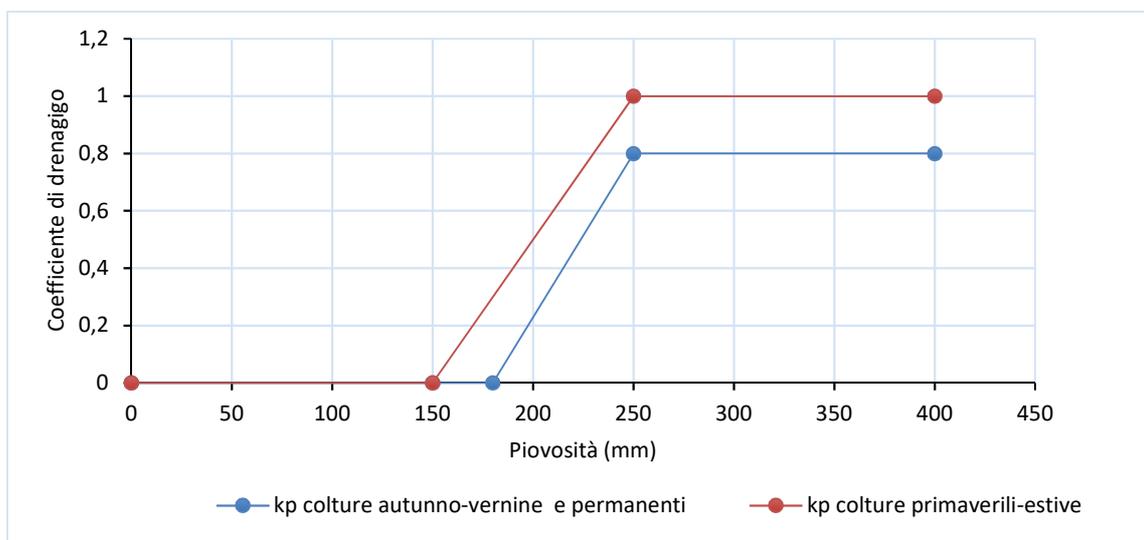


Figura 12. Coefficiente di drenaggio in funzione della piovosità tra ottobre-febbraio e della coltura

L'entità della lisciviazione è analoga per i suoli su cui sono presenti colture autunno-vernine e permanenti, poiché l'elemento cardine da cui dipende il processo è la presenza o meno di piante in inverno. È stato determinato che sui terreni sui cui sono presenti le colture primaverili-estive, la lisciviazione è maggiore, in quanto nel periodo invernale il terreno è nudo. Fino a 150 mm non si assiste a fenomeni di lisciviazione sui terreni sui quali sono coltivate solo colture primaverili-estive, mentre per gli altri casi il discorso è valido a partire da 180 mm. Oltre 250 mm di pioggia, la lisciviazione è massima, ma è pari a 1 per le colture primaverili-estive e 0,8 negli altri casi.

8.4.3. Indicatore economico

L'indicatore fornisce indicazioni circa il potenziale risparmio nell'acquisto di concimi minerali da parte dell'agricoltore. Dai fabbisogni totali vengono detratti gli apporti organici eventualmente distribuiti: si considera ottimale la gestione della concimazione organica, in quanto vincolante e dipendente dalle esigenze aziendali. Ai fabbisogni, al netto delle concimazioni organiche, vengono integrati i nutrienti apportati con i concimi minerali. A questo punto si determina un eccesso o un deficit: nel caso di un apporto superiore ai reali fabbisogni, l'indicatore calcola il potenziale risparmio economico verso cui l'agricoltore potrebbe andare incontro. L'indicatore viene calcolato per singolo valore nutritivo, restituendo un valore economico, totale e per ettaro, in urea, perfosfato triplo e cloruro di potassio che l'agricoltore potrebbe risparmiare. La logica alla base dell'indicatore è presentato in Figura 13:

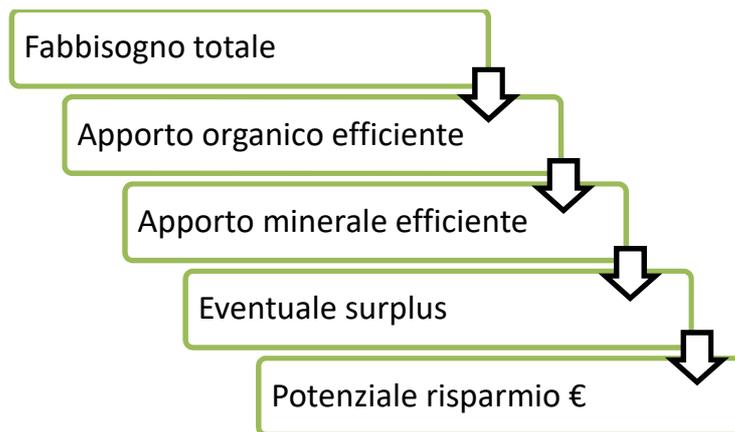


Figura 13. Schema dell'indicatore economico

8.4.4. Indicatori per l'emissione di ammoniaca da campo

L'indicatore fornisce indicazioni circa l'emissione di ammoniaca da campo derivante dalla gestione della concimazione organica e minerale, attribuendo un valore a se stante sia per l'una che per l'altra pratica. L'emissione di ammoniaca da concime minerale, si calcola ricorrendo all'equazione 31:

$$E_M = C_M * EF \quad (31)$$

in cui C_M è il quantitativo di azoto minerale distribuito (kg N ha^{-1}) ed EF è un *emission factor* che tiene in considerazione la temperatura, il pH e la tipologia di concime (Figura 13). Essendo influenzato da molte variabili, EF è mutevole, come rappresentato dal grafico. La fonte da cui sono stati presi i valori degli EF deriva dal protocollo 3.D *Crop Production dell'European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)* 2016.

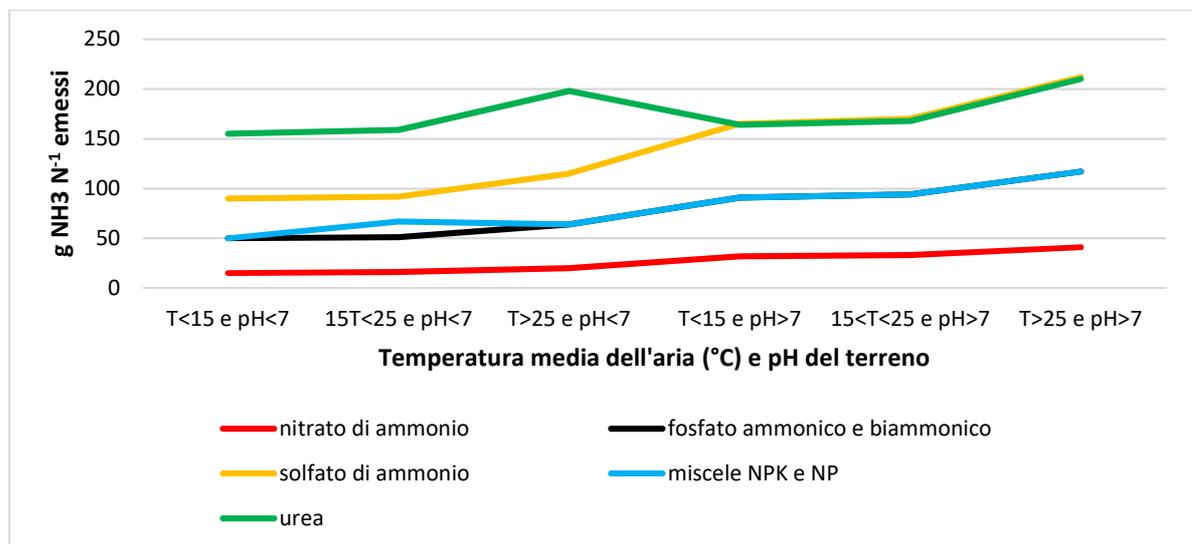


Figura 14. Emissione di ammoniaca dei principali concimi minerali in base alla temperatura e pH (3.D *Crop Production EMEP*)

Le emissioni di ammoniaca derivante dai reflui zootecnici si calcolano ricorrendo all'equazione 32:

$$E_O = N_{ZOOT} * X_{TAN} * EF_{spreading} \quad (32)$$

in cui N_{ZOOT} è l'azoto di origine zootecnica al netto delle perdite di stalla e stoccaggio: i valori sono specifici per specie e categoria animale e derivano dai dati forniti dal 10/R/2007. X_{TAN} è la percentuale di azoto ammoniacale rispetto all'azoto zootecnico. $EF_{spreading}$ è l'*emission factor* dell'ammoniaca ed è specifico per ciascun refluo zootecnico. X_{TAN} ed $EF_{spreading}$ sono valori tabellari forniti da EMEP (Tabella 30).

Tabella 30. X_{TAN} ed $EF_{spreading}$ NH_3 per i principali reflui zootecnici (EMEP)

Refluo zootecnico	X_{TAN}	$EF_{spreading}$ NH_3
Pollina	0,7	0,69
Liquame suino	0,7	0,4
Liquame bovino	0,6	0,55
Digestato	0,6	0,55
Letame suino	0,7	0,81
Letame bovino	0,6	0,79

A parità di azoto nel refluo zootecnico, la pollina ed il letame suino e bovino sono più soggette a perdite per volatilizzazione rispetto al liquame ed al digestato.

Inoltre Monitro prevede che vengano sviluppati anche altri indicatori di emissioni, quali emissioni di ammoniaca da stalla, emissioni di metano, protossido di azoto e polveri sottili sia da campo che da stalla, oggetto del lavoro di Marcellino (2018).

8.5. Proposta automatica del piano di concimazione

Oltre agli indicatori aziendali, Monitro.xlsx è in grado di restituire in automatico una proposta ottimizzata del piano di concimazione, fornendo indicazioni circa le pratiche più consone da applicare. La proposta è specifica per ciascuna coltura ed è strutturata come segue (Figura 15):

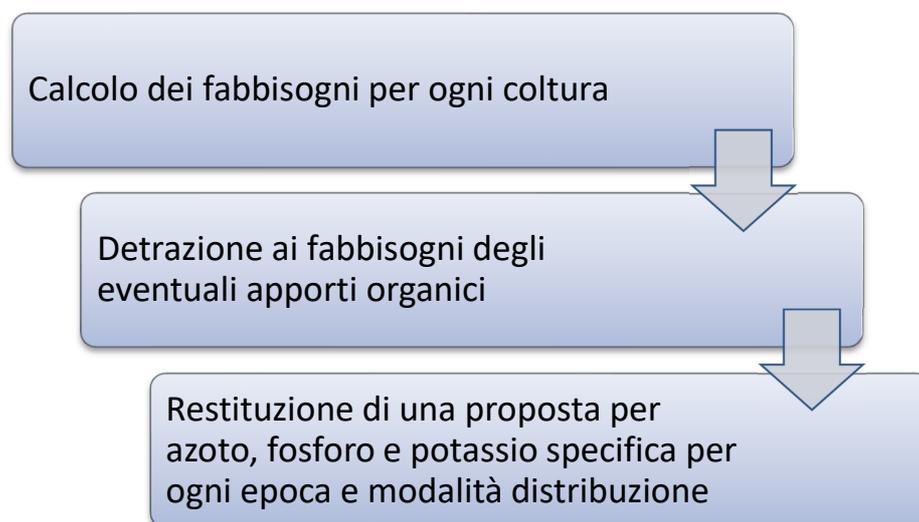


Figura 15. Schema della proposta fornita all'agricoltore

La proposta restituisce indicazioni solo per la concimazione minerale, in quanto la gestione della concimazione organica è difficilmente modificabile: le esigenze aziendali vincolano la distribuzione degli effluenti, spingendo perciò l'agricoltore al ricorso di una strategia di concimazione organica consona ai limiti logistici.

9. Risultati e discussione

Dislocate tra le province di Cuneo, Torino, Alessandria e Vercelli, le aziende oggetto del lavoro sono in tutto 41, di cui 31 ad indirizzo zootecnico e 10 ad indirizzo cerealicolo. Tra le aziende ad indirizzo zootecnico si distinguono:

- 3 aziende di bovini da ingrasso di razza piemontese;
- 21 aziende di bovini da latte;
- 5 aziende linea vacca-vitello di razza piemontese;
- 2 aziende di suini da ingrasso.

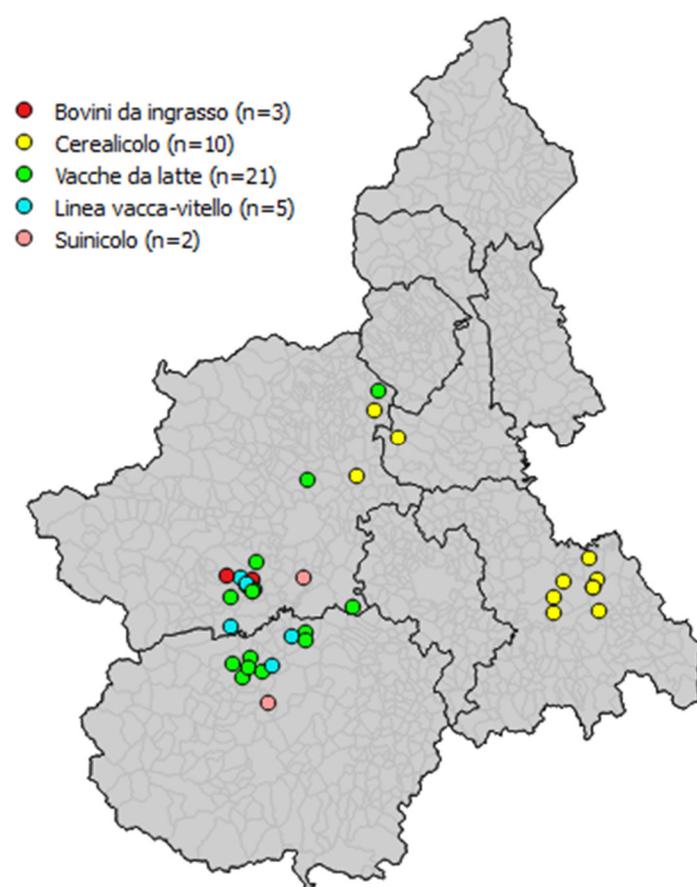


Figura 16. Ubicazione delle aziende analizzate in base all'indirizzo produttivo (scala 1:2500000)

Si riporta una breve descrizione delle aziende (Tabella 31):

Tabella 31. Indirizzo produttivo, SAU (ha), coltura principale e ubicazione delle aziende prese in analisi

Azienda	Indirizzo produttivo	SAU (ha)	Prima coltura per superficie	Provincia
cer_1	Cerealicolo	119	Frumento tenero	Alessandria
cer_2	Cerealicolo	202	Frumento tenero	Alessandria
cer_3	Cerealicolo	73	Sorgo	Alessandria
cer_4	Cerealicolo	56	Mais	Torino
cer_5	Cerealicolo	123	Mais	Vercelli
cer_6	Cerealicolo	86	Frumento duro	Alessandria
cer_7	Cerealicolo	87	Frumento tenero	Alessandria
cer_8	Cerealicolo	138	Frumento tenero	Alessandria
cer_9	Cerealicolo	56	Frumento tenero	Alessandria
cer_10	Cerealicolo	131	Mais	Alessandria
zoo_1	Bovini da carne	49	Mais	Torino
zoo_2	Bovini da carne	37	Mais	Torino
zoo_3	Bovini da carne	27	Mais	Torino
zoo_4	Bovini da latte	108	Mais	Torino
zoo_5	Bovini da latte	42	Mais	Torino
zoo_6	Bovini da latte	62	Mais	Cuneo
zoo_7	Bovini da latte	32	Mais	Torino
zoo_8	Bovini da latte	31	Prato stabile	Cuneo
zoo_9	Bovini da latte	109	Mais	Torino
zoo_10	Bovini da latte	46	Mais	Cuneo
zoo_11	Bovini da latte	77	Mais	Torino
zoo_12	Bovini da latte	45	Mais	Torino
zoo_13	Bovini da latte	46	Prato stabile	Torino
zoo_14	Bovini da latte	101	Mais	Cuneo
zoo_15	Bovini da latte	32	Mais	Torino
zoo_16	Bovini da latte	52	Mais	Cuneo
zoo_17	Bovini da latte	101	Mais	Cuneo
zoo_18	Bovini da latte	101	Mais	Cuneo
zoo_19	Bovini da latte	72	Mais	Torino
zoo_20	Bovini da latte	103	Mais	Torino
zoo_21	Bovini da latte	88	Mais	Torino
zoo_22	Bovini da latte	60	Mais	Cuneo
zoo_23	Bovini da latte	42	Mais	Torino
zoo_24	Bovini da latte	43	Mais	Torino
zoo_25	Linea vacca-vitello	54	Mais	Torino
zoo_26	Linea vacca-vitello	45	Mais	Cuneo
zoo_27	Linea vacca-vitello	33	Prato stabile	Cuneo
zoo_28	Linea vacca-vitello	37	Mais	Torino
zoo_29	Linea vacca-vitello	130	Mais	Torino
zoo_30	Suini	69	Mais	Cuneo
zoo_31	Suini	17	Mais	Torino

In Figura 17 si propone la ripartizione colturale di ogni azienda:

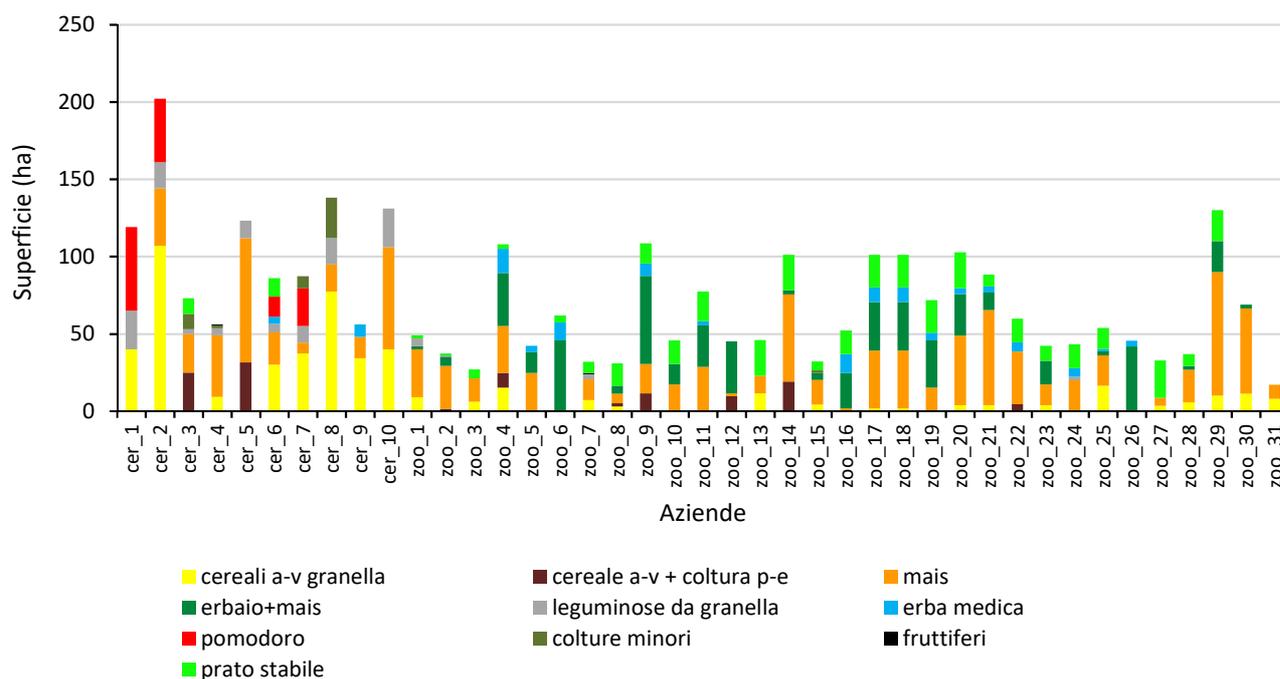


Figura 17. Ripartizione colturale delle aziende oggetto del lavoro

In questo lavoro sono stati analizzati circa 3000 ha. La SAU media è pari a 72 ha, con una superficie aziendale che varia tra 17 e 202 ha. Le maggiori estensioni si concentrano nelle aziende cerealicole, la cui SAU media è pari a 107 ha, rispetto i 61 ha delle aziende zootecniche.

La coltura più presente è il mais da granella o trinciato, coltivato in quasi tutte le aziende, ad eccezione di cer_1, zoo_6 e zoo_26. La quasi totalità del frumento tenero da granella si concentra nelle aziende cerealicole, mentre non suscita particolare interesse degli altri indirizzi produttivi. La coltivazione di loiessa-mais, erba medica e prato è concentrata nelle aziende zootecniche, ad esclusione di quelle suinicole, al fine di integrare l'alimentazione dei bovini. Nella rotazione delle aziende cerealicole viene inserito anche il legume da granella attraverso il fagiolo o il pisello proteico. Quattro delle sette aziende cerealicole, situate nella provincia di Alessandria, destinano parte della propria SAU al pomodoro, denotando particolare interesse per questa coltura.

In Figura 18 si propone il carico animale medio per superficie (t PV ha⁻¹) per le aziende zootecniche:

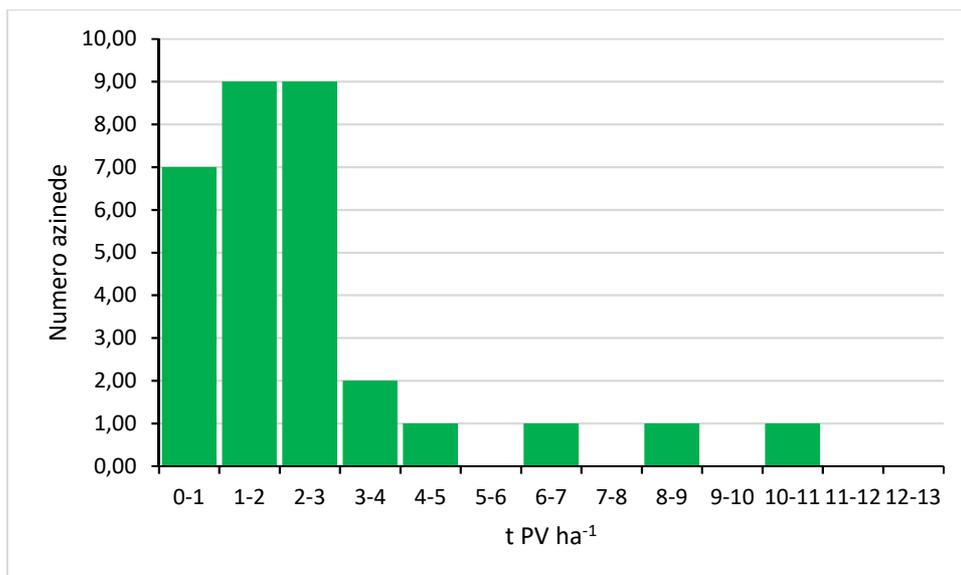


Figura 18. Indice di frequenza sul carico medio zootecnico (t PV ha⁻¹)

Si evidenziano due picchi di frequenza (n=9) in corrispondenza dei *range* 1-2 t PV ha⁻¹ e 2-3 t PV ha⁻¹, in cui la maggior parte delle aziende sono di bovini da latte. Concentrate nel range 0-1 t PV ha⁻¹, le aziende con minor carico animale rispetto alla superficie sono quelle di bovini all'ingrasso e linea vacca-vitello, ad eccezione di zoo_26 (3,09 t PV ha⁻¹). Sono quattro le aziende che superano 4 t PV ha⁻¹, due di bovini da latte e due suinicole:

- zoo_12 con 6,80 t PV ha⁻¹ (bovini da latte);
- zoo_15 con 4,94 t PV ha⁻¹ (bovini da latte);
- zoo_30 con 8,59 t PV ha⁻¹ (suini);
- zoo_31 con 10,71 t PV ha⁻¹ (suini).

In Figura 19 si riporta la ripartizione della concimazione azotata media di ciascun indirizzo produttivo. Le aziende cerealicole acquistano il 78% dell'azoto sotto forma di concime minerale, mentre la restante quota ha origine organica. Il compost (9%) e il letame (7%) sono i due ammendanti di origine organica prevalentemente acquisiti: il primo viene comprato da due aziende ed applicato come concimazione di fondo, mentre il secondo viene acquistato da una sola azienda e concentrato sui prati. La pollina (4%) e il digestato (2%) vengono anche loro distribuiti prima dell'aratura.

Le aziende di bovini da ingrasso e quelle linea vacca-vitello utilizzano la stessa quantità di azoto minerale (circa il 60%), mentre è la ripartizione della frazione organica ad essere differente. Le aziende di bovini da ingrasso non cedono letame ad un impianto di digestione anaerobica, a differenza delle aziende linea vacca-vitello in cui, in un caso viene ceduto il refluo ad un digestore, mentre in un altro viene acquistato direttamente digestato. Un'azienda da ingrasso acquista la pollina che distribuisce in pre-semina su mais.

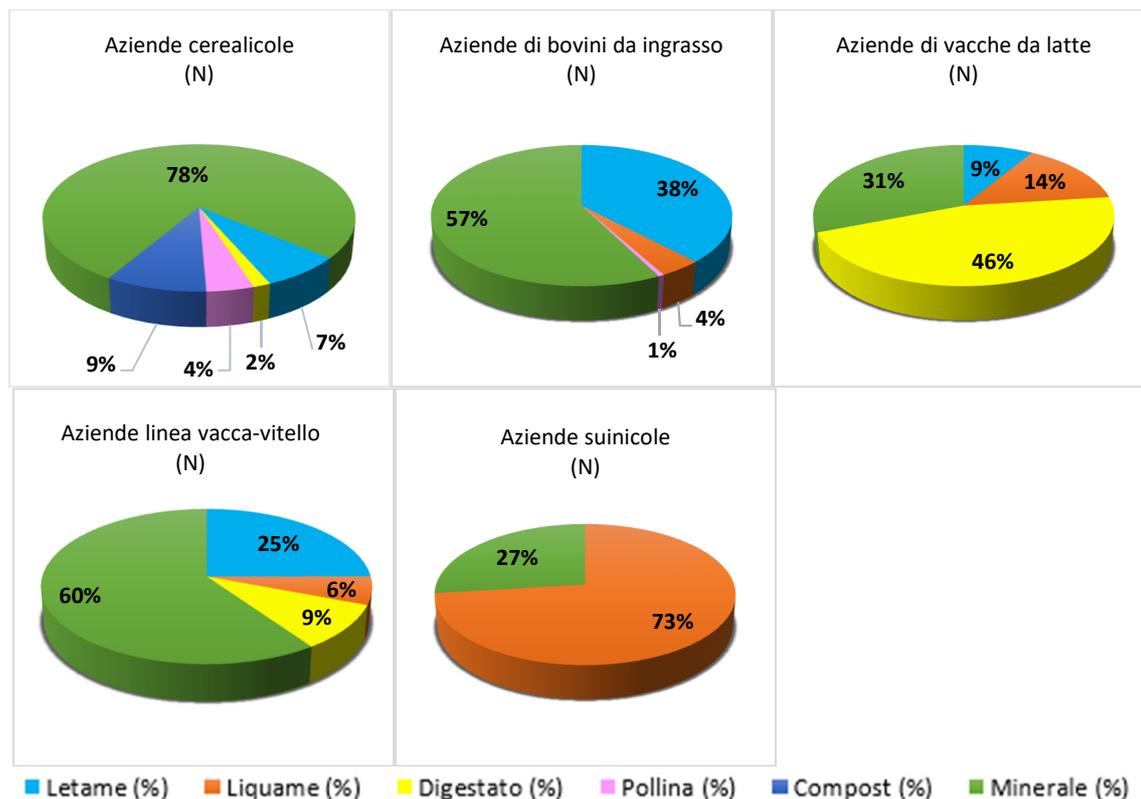


Figura 19. Ripartizione della concimazione azotata per indirizzo produttivo

Le aziende di vacche da latte acquistano il 31% dell'azoto sotto forma di concime minerale, denotando una maggiore indipendenza sul mercato rispetto alle tipologie di aziende descritte precedentemente. Destinano gran parte dei reflui prodotti (circa il 67%) ad un impianto di digestione anaerobica, mentre solo sei aziende utilizzano il refluo prodotto tal quale.

Le aziende suinicole sono la categoria più semplice, in quanto basano la loro concimazione azotata sulla distribuzione del liquame prodotto all'interno del centro (73% rispetto al totale), risultando quindi la categoria più indipendente riguardo l'acquisto di azoto minerale.

Se per il fosforo la ripartizione delle fonti concimanti è simile, il discorso è diverso per il potassio, come mostrato in Figura 20. L'unica differenza che si riscontra rispetto alla ripartizione della concimazione azotata e fosfatica è che si ricorre meno all'impiego di concime minerale potassico. Nelle aziende cerealicole assume un peso maggiore il potassio assunto attraverso le concimazioni organiche; gran parte del potassio minerale deriva dalle concimazioni applicate sul pomodoro nelle quattro aziende di Alessandria che lo coltivano. Nonostante venga coltivata la medica (coltura potassofila) per fini nutrizionali, il discorso non cambia per le aziende di bovini da ingrasso (35%), di vacche da latte (17%) e linea vacca-vitello (20%), raggiungendo il 4% nelle aziende suinicole.

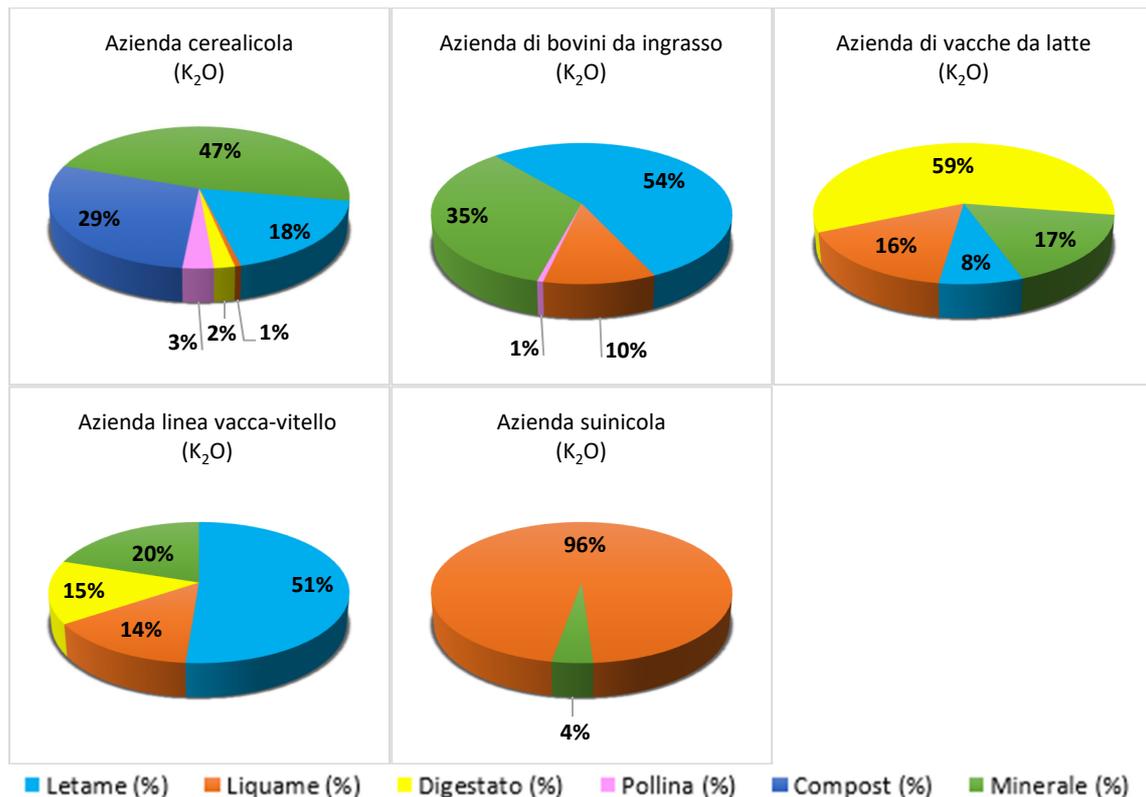


Figura 20. Ripartizione della concimazione potassica per indirizzo produttivo

9.1. Lo scenario attuale

9.1.1. Il piano di concimazione secondo le strategie attuali

Si riporta la Tabella 32 che fornisce una panoramica circa i dati sul surplus o deficit medi ottenuti dalle interviste in azienda, suddivisi per indirizzo produttivo. I dati sono stati caricati su Monitro.xlsx, mantenendo le strategie di concimazione dichiarate dall'agricoltore.

Nelle aziende con bovini da ingrasso e in quelle con vacche nutrici la gestione dell'azoto è apparsa bilanciata, con un surplus medio rispettivamente pari a 5 kg N ha^{-1} e 11 kg N ha^{-1} . Lo studio di Sacco *et al.* (2003), volto a sviluppare un sistema di informazione agronomico per la stima dei bilanci di azoto, fosforo e potassio su larga scala, ha indicato che le aziende di bovini da ingrasso hanno presentato un surplus pari a 194 kg N ha^{-1} , in quanto sono stati stimati 281 kg ha^{-1} di azoto organico, rispetto ai soli 82 kg ha^{-1} di azoto organico valutati in questa tesi: è bene sottolineare che lo studio di Sacco *et al.* (2003) si è svolto 15 anni fa, in un panorama zootecnico ben diverso dall'odierno. I volumi più contenuti di reflui distribuiti in campo hanno agevolato il raggiungimento di un bilancio più equilibrato rispetto alle aziende suinicole, il cui surplus azotato medio si è dimostrato il peggiore (135 kg N ha^{-1}): ciò è da imputare sia all'impiego di liquame in campo, sia all'apporto proveniente dai residui in campo, i quali non vengono mai asportati. Lo studio di Sacco *et al.* (2003) ha stimato un surplus doppio per le aziende suinicole (289 kg N ha^{-1}), a causa dell'elevato apporto di azoto organico, pari a 377 kg N ha^{-1} , rispetto ai 192 kg N ha^{-1} quantificati in questo lavoro.

Tabella 32. Surplus medio dell'azoto (kg N ha^{-1}) in funzione della strategia di concimazione attuata dall'agricoltore

Indirizzo produttivo	Cerealicolo (n=10)		Bovini da ingrasso (n=3)		Vacche da latte (n=21)		Linea vacca-vitello (n=5)		Suinicolo (n=2)	
	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard
Assorbimento (kg N ha^{-1})	219	12	309	34	301	9	248	17	224	16
Residui precessione (kg N ha^{-1})	23	5	20	8	4	2	3	2	44	6
Apporti naturali (kg N ha^{-1})	49	4	63	12	76	3	71	13	57	6
Bfx (kg N ha^{-1})	10	3	8	3	16	4	7	3	0	0
Fabbisogno (kg N ha^{-1})	136	8	219	24	205	10	167	18	125	7
Apporti organici efficienti (kg N ha^{-1})	26	13	82	3	145	15	78	21	192	5
Apporti minerali efficienti (kg N ha^{-1})	163	19	142	10	108	7	100	16	68	28
Apporti tot efficienti (kg N ha^{-1})	189	23	224	13	253	15	178	28	260	23
Surplus/deficit (kg N ha^{-1})	52	22	5	31	48	15	11	17	135	16

*Gli apporti naturali sono calcolati come la somma dell'azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica, dalla deposizione atmosferica e dagli apporti organici effettuati l'anno precedente

Le aziende cerealicole e le aziende di vacche da latte si sono collocate in una posizione intermedia: il surplus medio di azoto è rispettivamente pari a 52 kg N ha⁻¹, dato confermato da Sacco *et al.* (2003), e 48 kg N ha⁻¹. Le aziende cerealicole non hanno ricorso quasi mai agli apporti organici, mentre, nonostante nelle aziende con vacche da latte siano state distribuite elevate quantità di liquami (145 kg N medi ha⁻¹), il considerevole fabbisogno richiesto (205 kg N ha⁻¹), dovuto alla presenza della doppia coltura, ed il ridotto impiego di concime minerale (108 kg N medi ha⁻¹), ha permesso loro di mantenere un surplus limitato a qualche decina di kg N ha⁻¹. Fanguero *et al.* (2008), i quali hanno determinato i *farm-gate balances* per le aziende zootecniche da latte, hanno indicato invece un apporto minerale azotato medio maggiore, compreso tra 185 kg N ha⁻¹ e 225 kg N ha⁻¹. Tabacco *et al.* (2018), il cui obiettivo è stata la valutazione dell'efficienza produttiva e degli impatti ambientali dei diversi sistemi foraggeri nelle aziende zootecniche, hanno ipotizzato un surplus medio azotato pari a 181 kg N ha⁻¹; lo studio di Gaudino *et al.* (2014), incentrato sullo sviluppo di indicatori agro-ambientali per la descrizione dei sistemi agricoli intensivi del Nord Italia, ha quantificato uno surplus medio azotato pari a 135 kg N ha⁻¹, attribuito alle ingenti quantità di concime minerale (soprattutto urea) impiegate, che superano i fabbisogni delle colture. Fumagalli *et al.* (2011), il cui obiettivo è stata l'analisi dei sistemi agricoli sostenibili in aziende zootecniche da latte, hanno ipotizzato un surplus medio di 132 kg N ha⁻¹, inferiore a quello indicato dall'analisi di Sacco *et al.* (2003), pari a 326 kg N ha⁻¹.

Gli apporti naturali, il cui *input* maggiore è rappresentato dalla mineralizzazione della sostanza organica, hanno fornito valori interessanti. È emerso che sono le aziende zootecniche, nella fattispecie quelle da latte (76 kg N ha⁻¹) e quelle con bovini da ingrasso (63 kg N ha⁻¹), a giovarne maggiormente; le annuali distribuzioni di liquame e letame hanno consentito un arricchimento del terreno più consistente rispetto alle aziende cerealicole (49 kg N ha⁻¹), le quali ricorrono solo alla concimazione minerale.

Sebbene il dato sia contenuto, il valore di azoto derivante dall'azotofissazione è stato maggiore all'interno delle aziende con vacche da latte (16 kg N ha⁻¹), poiché, al fine di raggiungere un sufficiente livello proteico nel latte, è necessario disporre di foraggiere. Il risultato (14 kg N ha⁻¹) è in linea con quanto riportato da Bassanino *et al.* (2007), il cui lavoro è stato incentrato sul bilancio dell'azoto delle aziende zootecniche in Italia, mentre Fumagalli *et al.* (2011) hanno stimato circa 31 kg N ha⁻¹ azotofissati. Tuttavia, lo stesso studio di Bassanino *et al.* (2007) ha indicato un'azotofissazione di 30 kg N ha⁻¹ nelle aziende con linea vacca-vitello, avendo ipotizzato una maggior presenza di leguminose all'interno di queste aziende, rispetto a quanto determinato con questo progetto (7 kg N ha⁻¹).

Si riportano i surplus/deficit medi del fosforo alla luce della strategia di concimazione attuata dall'agricoltore (Tabella 33).

Tabella 33. Surplus medio del fosforo ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) in funzione della strategia attuata dall'agricoltore

Indirizzo produttivo	Cerealicolo (n=10)		Bovini da ingrasso (n=3)		Vacche da latte (n=21)		Linea vacca-vitello (n=5)		Suinicolo (n=2)	
	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard
Assorbimento medio ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	92	5	135	23	126	5	104	10	100	8
Residui precessione medi ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	9	2	8	8	1	1	1	4	19	3
Fabbisogno medio ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	20	6	33	24	37	8	38	27	0	0
Apporti organici efficienti ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	23	11	66	6	147	17	88	29	176	2
Apporti minerali efficienti medi ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	56	11	91	40	40	5	49	15	7	6
Apporti tot efficienti medi ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	79	16	156	42	187	19	137	30	184	8
Surplus/deficit medi ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	59	16	124	18	150	21	99	6	184	8

* Il fabbisogno considera anche la disponibilità di fosforo nel suolo

Si sottolinea che i risultati ottenuti sono solo parzialmente confrontabili con la letteratura, in quanto l'approccio seguito, incentrato sul fabbisogno della coltura alla luce della dotazione del suolo, risulta essere una novità.

Le aziende cerealicole hanno presentato il surplus medio fosfatico più ridotto rispetto agli altri indirizzi produttivi, pari a 59 kg P₂O₅ ha⁻¹, in quanto si limita ai soli apporti minerali. Il risultato è in linea con quanto riportato da Sacco *et al.* (2003), ma con un valore inferiore (22 kg P₂O₅ ha⁻¹). Le aziende suinicole (184 kg P₂O₅ ha⁻¹) e quelle con vacche da latte (150 kg P₂O₅ ha⁻¹) hanno conseguito i surplus peggiori a causa del continuo impiego di apporto organico che rendono già ricco il suolo, riducendo il fabbisogno della coltura. Il dato sul surplus delle aziende suinicole non ha trovato conferma dallo studio di Sacco *et al.* (2003), il quale ha indicato un valore inferiore, pari a 103 kg P₂O₅ ha⁻¹. Gaudino *et al.* (2014) hanno quantificato per le aziende con vacche da latte un surplus medio di fosforo molto più contenuto (18 kg P₂O₅ ha⁻¹), giustificato dal fatto che le aziende oggetto del lavoro, dotate di terreni con un'elevata dotazione di fosforo, hanno interrotto le fertilizzazioni minerali. Come riportato prima, il piano di concimazione sviluppato in questa tesi prevedeva invece che, in caso di terreno ricco di fosforo, il fabbisogno della coltura fosse pari a zero, in quanto il fosforo di cui necessita sarà prelevato dal suolo: ciascun apporto minerale ed organico alimenta il surplus, di conseguenza elevato per le aziende con vacche da latte, le quali producono notevoli quantità di liquame. Inoltre, le aziende esaminate nello studio di Gaudino *et al.* (2014) avevano un carico zootecnico (1,08 t PV ha⁻¹ di vacche in lattazione) inferiore rispetto alle aziende esaminate per questo progetto (1,33 t PV ha⁻¹ di vacche in lattazione). Adenuga *et al.* (2018) hanno ipotizzato un surplus fosfatico medio pari a 25 kg P₂O₅ ha⁻¹, mentre Sacco *et al.* (2003) hanno indicato un surplus più consistente, ma sempre inferiore rispetto alle valutazioni di questo progetto (112 kg P₂O₅ ha⁻¹).

Pur mantenendo surplus elevati, si sono collocate in una posizione intermedia le aziende di bovini all'ingrasso (124 kg P₂O₅ ha⁻¹) e le aziende linea vacca-vitello (99 kg P₂O₅ ha⁻¹), a seguito di una minor produzione a livello aziendale di refluo zootecnico. Lo studio di Sacco *et al.* (2003) invece ha ottenuto che il surplus medio fosfatico delle aziende con bovini da carne è di 82 kg P₂O₅ ha⁻¹. Confrontando le aziende con bovini da carne con quelle con vacche da latte, è emerso che gli apporti fosfatici totali sono simili, tuttavia cambiano le proporzioni delle fonti, in quanto le aziende da ingrasso sopperiscono al minor apporto fosfatico organico (66 kg P₂O₅ ha⁻¹ rispetto a 147 kg P₂O₅ ha⁻¹), con una maggiore concimazione minerale (91 kg P₂O₅ ha⁻¹ rispetto a 40 kg P₂O₅ ha⁻¹).

Si riportano i surplus/deficit medi del potassio alla luce della strategia di concimazione attuata dall'agricoltore (Tabella 34)

Tabella 34. Surplus medio del potassio (kg K₂O ha⁻¹) in funzione della strategia attuata dall'agricoltore

Indirizzo produttivo	Cerealicolo (n=10)		Bovini da ingrasso (n=3)		Vacche da latte (n=21)		Linea vacca-vitello (n=5)		Suinicolo (n=2)	
	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard	Bilancio	Err. Standard
Assorbimento medio (kg K₂O ha⁻¹)	226	15	310	38	324	13	262	25	221	23
Residui precessione medi (kg K ₂ O ha ⁻¹)	20	9	49	20	6	5	5	4	113	15
Lisciviazione media (kg K ₂ O ha ⁻¹)	22	3	27	5	33	2	30	2	30	0
Fabbisogno medio (kg K₂O ha⁻¹)	78	26	240	54	203	31	194	60	40	36
Apporti organici efficienti medi (kg K ₂ O ha ⁻¹)	69	33	198	6	279	32	181	41	253	6
Apporti minerali efficienti medi (kg K ₂ O ha ⁻¹)	69	15	123	23	59	14	58	14	0	0
Apporti tot efficienti medi (kg K₂O ha⁻¹)	138	32	322	31	338	31	239	45	253	6
Surplus/deficit medio (kg K₂O ha⁻¹)	60	43	82	42	135	47	45	66	213	30

* Il fabbisogno considera anche la disponibilità di potassio nel suolo

Caratterizzate da valori al di sopra dello zero a causa dei terreni già mediamente ricchi, le aziende con le vacche nutrici ($45 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) e le aziende cerealicole ($60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) hanno presentato il surplus più limitato: il ridotto impiego di reflui zootecnici garantisce un surplus contenuto, analogo a dati precedentemente ottenuti (Sacco *et al.*, 2003). Le aziende suinicole ($213 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) e le aziende di vacche da latte ($135 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) si contraddistinguono per i surplus più elevati: l'elevata dotazione potassica del suolo e l'eccessivo ed annuale apporto di liquami, pari a $279 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ per le aziende con vacche da latte e a $253 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ per quelle suinicole, hanno comportato dei surplus così elevati. A gravare sul surplus delle aziende suinicole è l'input derivato dall'interramento dei residui ($113 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). Il ridotto impiego di concime minerale potassico nelle aziende con vacche da latte ($59 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) è stato confermato dal risultato proposto da Fanguero *et al.*, (2007), compreso tra $44 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ e $61 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. L'interramento dei residui ($113 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) rappresenta un'ulteriore voce che grava sul surplus delle aziende suinicole, già elevato di per sé: è stato stimato un surplus in linea con quanto riportato in questo progetto ($269 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) da Sacco *et al.* (2003); il surplus ottenuto con questo studio per le aziende con vacche da latte si è discostato molto ($325 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$).

Le aziende di bovini da ingrasso si sono collocate in posizione intermedia ($82 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$): nonostante gli apporti organici di potassio siano elevati, i consistenti assorbimenti, dovuti alla presenza di doppie colture, e la scarsa dotazione di potassio dei terreni presi in analisi, fanno sì che il surplus non sia eccessivo. Sacco *et al.* (2003) hanno supposto un valore superiore ($234 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) a causa del consistente apporto organico ($213 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$).

La lisciviazione è una voce del bilancio che si mantiene su livelli compresi tra 20 e $30 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ indipendentemente dall'indirizzo produttivo.

L'eterogeneità dei casi aziendali è ben evidenziata dalla Figura 21 in cui si nota come soprattutto per il potassio si siano presentate delle situazioni oscillanti da un minimo di $-290 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ ad un massimo di $548 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. L'azoto ed il fosforo si sono contraddistinti per una variabilità più controllata, soprattutto nelle aziende che ingrassano i bovini ed in quelle suinicole (in questo caso è anche imputato allo scarso numero di aziende esaminate). Le situazioni di maggiore disomogeneità nella concimazione sono apparse nelle aziende cerealicole e con vacche da latte. L'*outlayer* emerso tra i valori del fosforo tra le aziende cerealicole appartiene al caso aziendale cer_5, a causa dell'elevato impiego di fosfato biammonico e di 5-10-20, a cui si aggiungono anche 26 t ha^{-1} di pollina, raggiungendo in totale $188 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. L'*outlayer* tra i valori del fosforo nelle aziende zootecniche è rappresentato dal caso aziendale zoo_12: l'impiego di 127 t ha^{-1} di digestato a coltura, che raddoppia nel caso di doppia coltura, incrementa il surplus di fosforo a quota $417 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$.

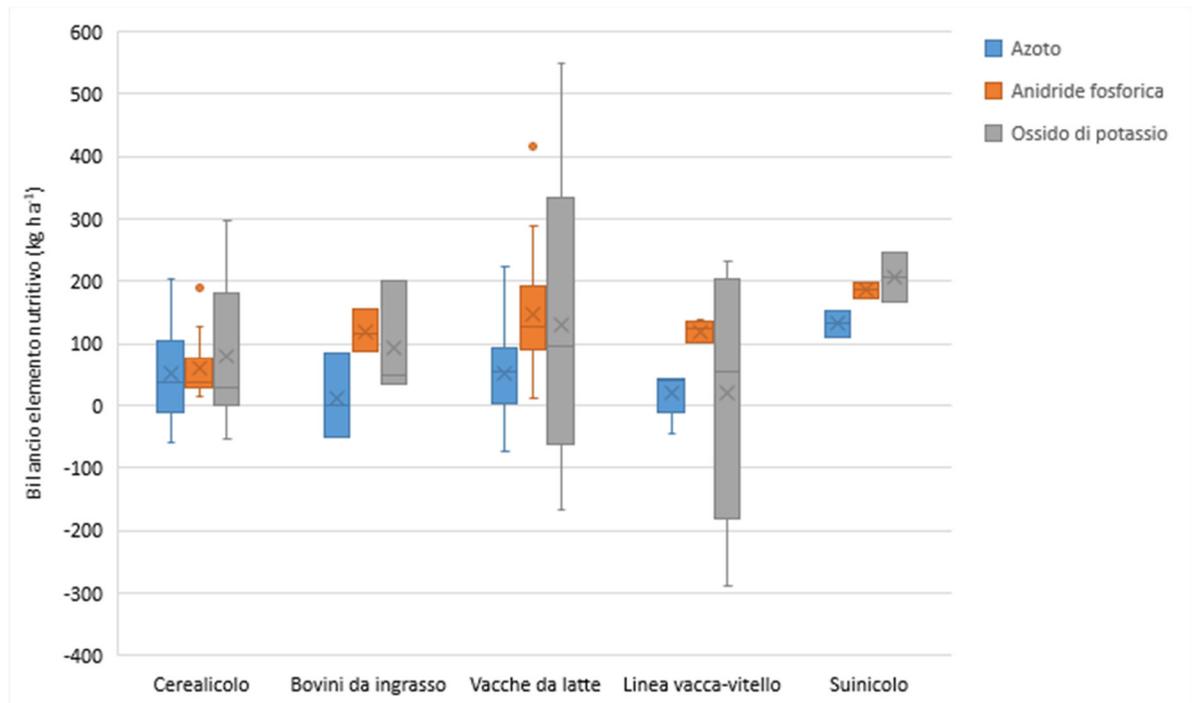


Figura 21. Distribuzione dei surplus e deficit per azoto, fosforo e potassio in funzione dell'indirizzo produttivo tramite *boxplot*

9.1.2. Indicatore surplus (+) o deficit (-) medio aziendale

L'indicatore surplus (+) o deficit (-) medio aziendale è stato sviluppato per capire se le pratiche attuate dall'agricoltore impoveriscono o arricchiscono il suolo; differisce dall'indicatore proposto precedentemente, in quanto le voci che lo compongono sono:

- l'assorbimento colturale, non tenendo in considerazione il fabbisogno della pianta (dipendente dalla dotazione di elemento nutritivo nel suolo);
- gli apporti di elemento nutritivo minerali e organici totali, tralasciando l'efficienza;
- i processi, come la deposizione atmosferica e l'azotofissazione, che aggiungono nel suolo un apporto di elemento nutritivo, escludendo pertanto la mineralizzazione (l'azoto minerale è già presente nel terreno sotto forma organica).

I risultati ottenuti tramite l'indicatore circa il surplus/deficit per l'azoto sono rappresentati in Figura 22. Le aziende cerealicole hanno mostrato una maggiore variabilità: i casi con un maggior surplus sono il cer_3 (177 kg N ha⁻¹) ed il cer_5 (202 kg N ha⁻¹). L'azienda cer_3 ricorre ad un'abbondante letamazione di fondo su tutte le colture aziendali, eccetto il prato stabile (mais da insilato, frumento da foraggio, sorgo da insilato e cece), pari a 80 t ha⁻¹, mentre cer_5 eccede con i concimi minerali. Sono presenti anche tre casi, cer_1 (-65 kg N ha⁻¹), cer_9 (-21 kg N ha⁻¹) e cer_6 (-4 kg N ha⁻¹) in cui si adottano pratiche che potrebbero impoverire a lungo termine il terreno di azoto (in particolare cer_1).

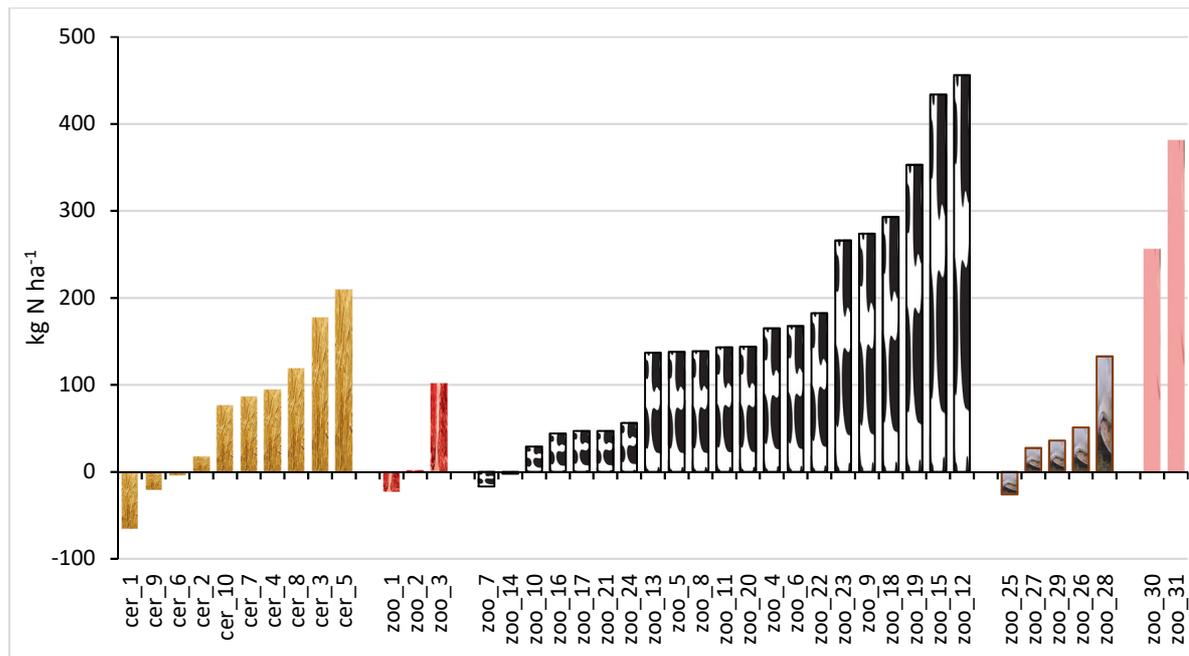


Figura 22. Indicatore di surplus/deficit aziendale attuale per l'azoto

Le aziende che ingrassano bovini si sono dimostrate le più bilanciate, a conferma di un'equilibrata concimazione azotata. I dati sono apparsi discordanti rispetto allo studio di Bassanino *et al.* (2007), in cui è stato evidenziato un surplus medio di 172 kg N ha⁻¹, attribuito ad un elevato apporto organico.

Le aziende con vacche da latte sono caratterizzate da una variabilità ancora più marcata, dipendente dalle dosi di refluo apportato, dall'integrazione col concime minerale e dal rapporto animale-superficie: il surplus/deficit fluttua da -2 kg N ha⁻¹ (zoo_14) fino a 434 kg N ha⁻¹ (zoo_12) e 456 kg N ha⁻¹ (zoo_15). Bassanino *et al.* (2007) hanno stimato un surplus medio pari a 154 kg N ha⁻¹ per le aziende di vacche da latte, valore inferiore rispetto ai 176 kg N ha⁻¹ di surplus medio stimato in questo progetto per questa categoria.

Le aziende con le vacche nutrici hanno presentato una situazione molto bilanciata: l'indicatore ha riportato un corretto equilibrio tra gli apporti e gli asporti. Solo zoo_28 un surplus pari a 128 kg N ha⁻¹ da imputare ad una concimazione organica (circa 50 t ha⁻¹ di letame) combinata ad un'abbondante concimazione minerale (circa 200 kg N ha⁻¹). La miglior efficienza di questo comparto è stata confermata, ma attribuendo un surplus di 78 kg N ha⁻¹ (Bassanino *et al.*, 2007).

Le due aziende suinicole sono accomunate da una situazione analoga caratterizzata da un surplus rispettivamente pari a 256 kg N ha⁻¹ (zoo_30) e 381 kg N ha⁻¹ (zoo_31), valori simili (230 kg N ha⁻¹) sono stati individuati sempre da Bassanino *et al.* (2007); l'unica causa dell'elevato surplus è da attribuire all'impiego di liquame, mai al di sotto delle 84 t ha⁻¹.

I risultati ottenuti tramite questo indicatore circa il surplus/deficit aziendale per il fosforo sono rappresentati in Figura 23.

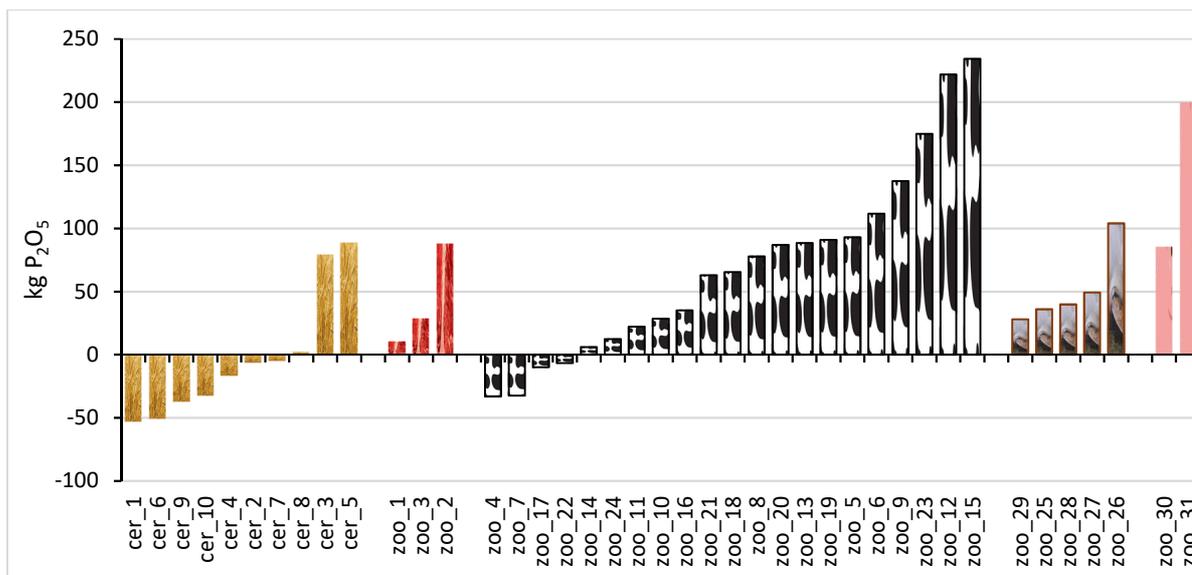


Figura 23. Indicatore di surplus/deficit aziendale attuale per il fosforo

Le aziende che ingrassano bovini hanno presentato un bilancio del fosforo abbastanza equilibrato: l'unica eccezione è rappresentata da cer_2 (88 kg P₂O₅ ha⁻¹), il quale apporta fino a 48 t ha⁻¹ di letame. Non usufruendo quasi mai di reflui zootecnici, le aziende cerealicole sono apparse in deficit fino a -53 kg P₂O₅ ha⁻¹ (cer_1) e -51 kg P₂O₅ ha⁻¹ (cer_6); al contrario surplus sono stati individuati tra cer_5, che ricorre ad un'elevata concimazione minerale, e cer_3, che eccede con la letamazione (80 t ha⁻¹). I risultati delle aziende con bovini da latte hanno indicato la maggior variabilità ed il maggior surplus. Fatta eccezione per cinque casi, in cui il surplus non supera i 25 kg P₂O₅ ha⁻¹, le pratiche adottate nelle restanti aziende porta ad un arricchimento del suolo non sempre positivo, specialmente se è già ben dotato di fosforo. Le aziende zoo_12 (222 kg P₂O₅ ha⁻¹) e zoo_15 (234 kg P₂O₅ ha⁻¹) rappresentano i casi più estremi caratterizzati da una concimazione organica che può raggiungere le 254 t ha⁻¹ di liquame nella situazione di doppia coltura. Le aziende con vacche nutrici sono apparse abbastanza equilibrate: eccezione fatta per zoo_26 (104 kg P₂O₅ ha⁻¹), il quale abbina 190 kg ha⁻¹ di fosfato biammonico ad una letamazione di 28 t ha⁻¹, i restanti casi non hanno mai superato i 50 kg P₂O₅ ha⁻¹. Le due aziende suinicole hanno mostrato eccessi considerevoli pari a 85 kg P₂O₅ ha⁻¹ (zoo_30) e 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ (zoo_31) a causa di terreni già ricchi a cui si apporta annualmente liquame.

I risultati ottenuti tramite l'indicatore circa il surplus/deficit per il potassio sono rappresentati in Figura 24.

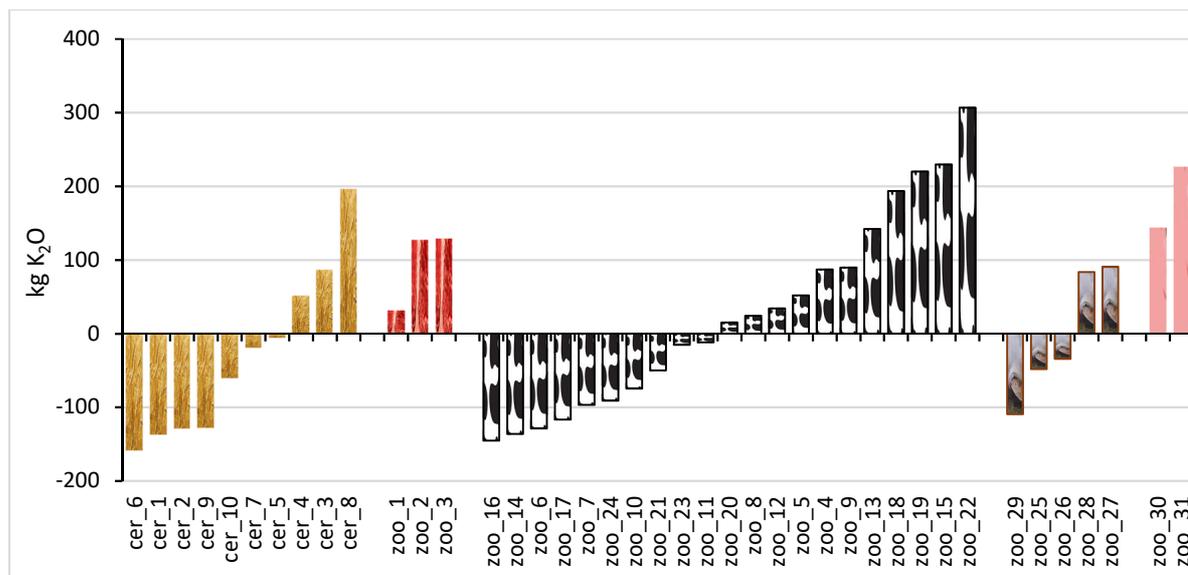


Figura 24. Indicatore di surplus/deficit aziendale attuale per il potassio

Avendo abbinato alla letamazione di fondo una concimazione media di 260 kg ha⁻¹ di cloruro di potassio, le aziende che ingrassano bovini hanno raggiunto surplus pari a 126 kg K₂O ha⁻¹ (zoo_2) e 128 kg K₂O ha⁻¹ (zoo_3). La variabilità per le aziende cerealicole è stata notevole, in quanto i deficit di cer_6 (-158 kg K₂O ha⁻¹), cer_1 (-136 kg K₂O ha⁻¹) e cer_2 (-128 kg K₂O ha⁻¹) sono da attribuire ad un'assente concimazione organica e una concimazione minerale insufficiente; all'opposto cer_8 (195 kg K₂O ha⁻¹) apporta eccessivo quantitativo di compost. Le aziende con vacche da latte hanno evidenziato una variabilità analoga alle aziende cerealicole; i deficit di zoo_16 (-145 kg K₂O ha⁻¹) e zoo_14 (-136 kg K₂O ha⁻¹) sono da attribuire alla mancata concimazione minerale su prati e medicaie (specie potassofila), mentre il surplus di zoo_22 (307 kg K₂O ha⁻¹) ha presentato il problema opposto. Le aziende con vacche nutrici hanno registrato un andamento simile a quello delle aziende cerealicole ma con deficit e surplus più contenuti; mentre le aziende suinicole si sono contraddistinte per un surplus attribuibile all'eccessivo apporto di liquame.

9.1.3. Indicatore economico

L'indicatore economico fornisce indicazione circa il potenziale risparmio che l'agricoltore potrebbe ottenere se si riportasse a bilancio la concimazione. Il potenziale risparmio è espresso per superficie (€ ha⁻¹) e viene calcolato per singolo valore nutritivo, restituendo un valore in urea, perfosfato triplo e cloruro di potassio che l'agricoltore potrebbe risparmiare.

Si propone la Tabella 35 in cui si descrive il potenziale risparmio medio per ciascuna categoria aziendale alla luce delle strategie attuate dall'agricoltore, associando un valore economico al surplus o deficit.

Tabella 35. Indicatore sul potenziale risparmio medio nell'acquisto di concimi minerali in base all'indirizzo produttivo

Indirizzo produttivo	Risparmio economico medio potenziale (€ ha ⁻¹)							
	N in urea		P ₂ O ₅ in perfosfato triplo		K ₂ O in cloruro di potassio		Totale	
	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard
Cerealicolo (n=10)	44	17	20	9	12	7	75	27
Bovini da ingrasso (n=3)	17	26	19	12	29	9	65	39
Vacche da latte (n=21)	40	10	13	3	-3	10	50	19
Linea vacca-vitello (n=5)	13	11	18	9	-5	24	26	42
Suinicolo (n=2)	132	28	24	24	13	13	169	64

Alla luce delle strategie di concimazione attuate dall'agricoltore, si evidenzia che le aziende suinicole potrebbero risparmiare più di tutte le altre categorie, soprattutto se si esamina l'azoto (132€ ha⁻¹): è un valore che include anche l'eccessiva concimazione sotto forma di liquame, la quale non si può ridurre a meno che non vengano acquisiti nuovi terreni o il refluo non venga ceduto in asservimento. Si ipotizza un risparmio complessivo pari a 169€ ha⁻¹ per l'azienda suinicola. Essendo una categoria il cui bilancio è equilibrato, è stato stimato un risparmio medio pari a 26€ ha⁻¹ per le aziende con vacche nutrici. Per le aziende cerealicole si è previsto un risparmio medio totale pari a 75€ ha⁻¹ di cui 44€ ha⁻¹ provengono dall'eccessiva concimazione azotata. Si sono collocate in posizione intermedia le aziende con bovini da latte (50€ ha⁻¹) e da carne (65€ ha⁻¹). Le aziende con vacche da latte hanno presentato un risparmio complessivo così ridotto perché l'indicatore considera gli apporti organici efficienti e non i complessivi: spandendo i reflui nei periodi meno opportuni in cui l'efficienza è bassa, è stato quantificato un risparmio minore di quanto in realtà non lo sia.

9.1.4. Indicatore sull'emissione di NH₃

L'indicatore fornisce indicazioni riguardo l'emissione di ammoniaca da campo derivante dalla gestione della concimazione organica e minerale, attribuendo un valore a se stante sia per l'una che per l'altra pratica, sulla base del protocollo 3.D *Crop Production dell'European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) 2016*.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti sull'emissione di ammoniaca in campo alla luce degli interventi agronomici attuali (Figura 25):

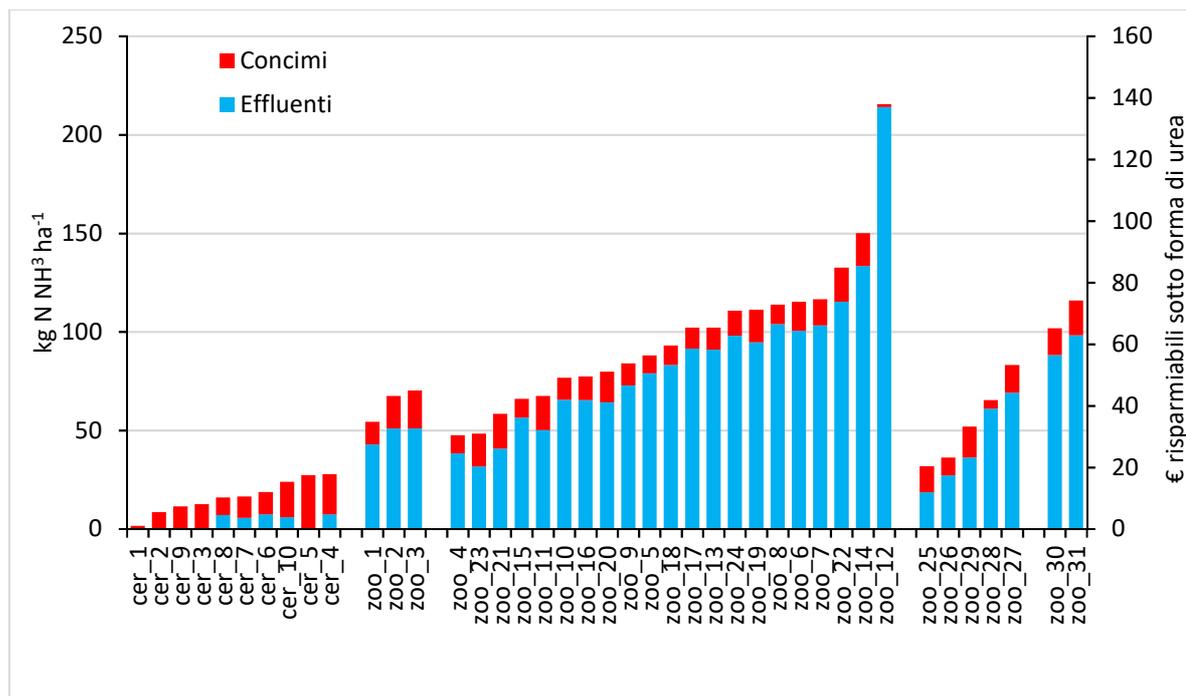


Figura 25. Emissione aziendale da campo di ammoniaca da concime minerale e da refluo zootecnico e perdita economica espressa in urea

Le aziende suinicole (113 kg N NH₃ ha⁻¹ medi) e le aziende con vacche da latte (104 kg N NH₃ ha⁻¹ medi) risultano esser i comparti che emettono da campo il maggior quantitativo di ammoniaca, con un risparmio potenziale rispettivamente pari a 71€ ha⁻¹ e 56€ ha⁻¹: I risultati di Sainju (2017) hanno stimato che il comparto suinicolo emette da campo 62 kg N NH₃ ha⁻¹, mentre le aziende con vacche da latte circa 66 kg N NH₃ ha⁻¹. producendo prevalentemente liquame rispetto agli altri comparti zootecnici, questo genera un maggior surplus che causa una maggior emissione da campo. Il lavoro di Gaudino *et al.* (2014) ha stimato un valore di emissione di ammoniaca da campo inferiore rispetto a quanto presentato (65 kg N NH₃ ha⁻¹). Non adoperando quasi mai reflui zootecnici, il comparto cerealicolo riduce le emissioni sino a 26 kg N NH₃ ha⁻¹ medi, come è stato confermato da Sainju (2017). Le aziende di bovini da ingrasso (64 kg N NH₃ ha⁻¹) e linea vacca- vitello (54 kg N NH₃ ha⁻¹) potrebbero raggiungere un risparmio medio potenziale rispettivamente pari a 41€ ha⁻¹ e 34€ ha⁻¹.

9.1.5. Indicatore sulla lisciviazione

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti sulla lisciviazione media per indirizzo produttivo alla luce della strategia attuata dall'agricoltore (Tabella 36).

Tabella 36. Lisciviazione media di azoto (kg N ha⁻¹) sulla base della strategia attuale

Indirizzo produttivo	Media di kg N lisciviati ha ⁻¹	Err. Standard
Cerealicolo (n=10)	36	8
Bovini da ingrasso (n=3)	22	12
Vacche da latte (n=21)	38	6
Linea vacca-vitello (n=5)	23	8
Suinicolo (n=2)	65	8

I terreni più soggetti a lisciviazione sono di proprietà delle aziende suinicole (65 kg N ha^{-1}). È un valore in linea con quanto evidenziato attraverso l'indicatore del surplus/deficit: l'esasperato impiego di liquame rende lisciviabile l'azoto in eccesso. I terreni appartenenti alle aziende con bovini da latte hanno mostrato una lisciviazione media pari a 38 kg N ha^{-1} , ma è il comparto con maggiore variabilità (dev. standard 27 kg N ha^{-1}) con valori oscillanti tra 4 kg N ha^{-1} lisciviati (zoo_14) e 80 kg N ha^{-1} (zoo_15). I terreni appartenenti alle aziende di bovini da ingrasso (22 kg N ha^{-1}) e con linea vacca-vitello (23 kg N ha^{-1}) sono apparsi meno soggetti a lisciviazione a conferma di una concimazione mediamente equilibrata. Il comparto cerealicolo si colloca in posizione intermedia (36 kg N ha^{-1}) con un picco di 83 kg N ha^{-1} (cer_5).

9.2. Lo scenario ottimizzato

9.2.1. Il piano di concimazione secondo le strategie ottimizzate

Di seguito è proposta una tabella in cui si descrive il risparmio di concime minerale conseguito con le strategie di concimazioni ottimizzate (Tabella 37)

Tabella 37. Surplus/deficit medio ottimizzato ha^{-1} ed azoto, fosforo e potassio risparmiati ($\% \text{ha}^{-1}$) attraverso le concimazioni minerali ottimizzate

	Indirizzo produttivo	Cerealicolo (n=10)	Bovini da ingrasso (n=3)	Vacche da latte (n=21)	Linea vacca-vitello (n=5)	Suinicolo (n=2)
N	Surplus/deficit medio non ottimizzato (kg ha^{-1})	52	5	48	11	135
	N minerale risparmiato durante l'ottimizzazione ($\% \text{ha}^{-1}$)	150	132	223	134	32
	Surplus/deficit medio ottimizzato (kg ha^{-1})	9	-24	8	-11	86
P ₂ O ₅	Surplus/deficit medio non ottimizzato (kg ha^{-1})	59	124	150	99	184
	P ₂ O ₅ minerale risparmiato durante l'ottimizzazione ($\% \text{ha}^{-1}$)	196	310	185	264	30
	Surplus/deficit medio ottimizzato (kg ha^{-1})	28	60	128	69	187
K ₂ O	Surplus/deficit medio non ottimizzato (kg ha^{-1})	60	82	135	45	213
	K ₂ O minerale risparmiato durante l'ottimizzazione ($\% \text{ha}^{-1}$)	120	77	160	70	0
	Surplus/deficit medio ottimizzato (kg ha^{-1})	55	56	128	44	191

I risultati hanno indicato che, eccezion fatta per le aziende suinicole (86 kg N ha^{-1}) che ricorrono solo alla distribuzione di liquame, l'ottenimento di un bilancio equilibrato è stato possibile solo sull'azoto, elemento nutritivo minerale maggiormente apportato in campo. Sul fosforo e sul potassio non è stato possibile portare il bilancio in equilibrio, in quanto la maggior parte degli apporti avviene tramite la distribuzione dei reflui, i cui quantitativi non sono stati volutamente modificati durante l'ottimizzazione: il fabbisogno di questi due elementi nutritivi dipende dalla dotazione dell'elemento stesso nel suolo. I risultati peggiori sono stati da attribuire alle aziende con bovini da latte ($128 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $128 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) e a quelle suinicole ($187 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $191 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). L'unico caso in cui è stato possibile ridurre il surplus, sino a portarlo vicino all'equilibrio, è stato rappresentato

dalle aziende cerealicole $28 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $55 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$), in quanto apportano solo in rari casi il letame. I risultati ottenuti hanno mostrato che il comparto produttivo su cui si è operata la più drastica riduzione di concime minerale impiegato è stato quello con bovini da latte, sia per l'azoto ($223\% \text{ ha}^{-1}$) che per il potassio ($160\% \text{ ha}^{-1}$): è pratica erronea, ma diffusa abbinare alla liquamazione di fondo un'abbondante concimazione di cloruro di potassio e di urea che superano i fabbisogni della coltura. Per quanto riguarda il fosforo, è stata effettuata la maggior riduzione per le aziende da carne ($310\% \text{ ha}^{-1}$), in quanto in alcune situazioni, come ad esempio zoo_2, si è soliti apportare 394 kg ha^{-1} di fosfato biammonico. Questo discorso è analogo per le aziende con linea vacca-vitello, in cui è stato possibile limitare il surplus medio del $260\% \text{ ha}^{-1}$, a causa dell'eccessivo impiego di fosfato biammonico. In due situazioni, per le aziende con bovini da ingrasso (-24 kg N ha^{-1}) e per le aziende con linea vacca-vitello (-11 kg N ha^{-1}), è stato raggiunto un bilancio leggermente negativo: si è stabilito a priori che si considera ottimale un bilancio con il surplus/deficit compreso tra $\pm 30 \text{ kg ha}$ di elemento nutritivo.

9.2.2. Surplus (+) o deficit (-) medio aziendale

Di seguito si riporta l'indicatore surplus/deficit ottenuto con il piano di concimazione ottimizzato (Figura 26):

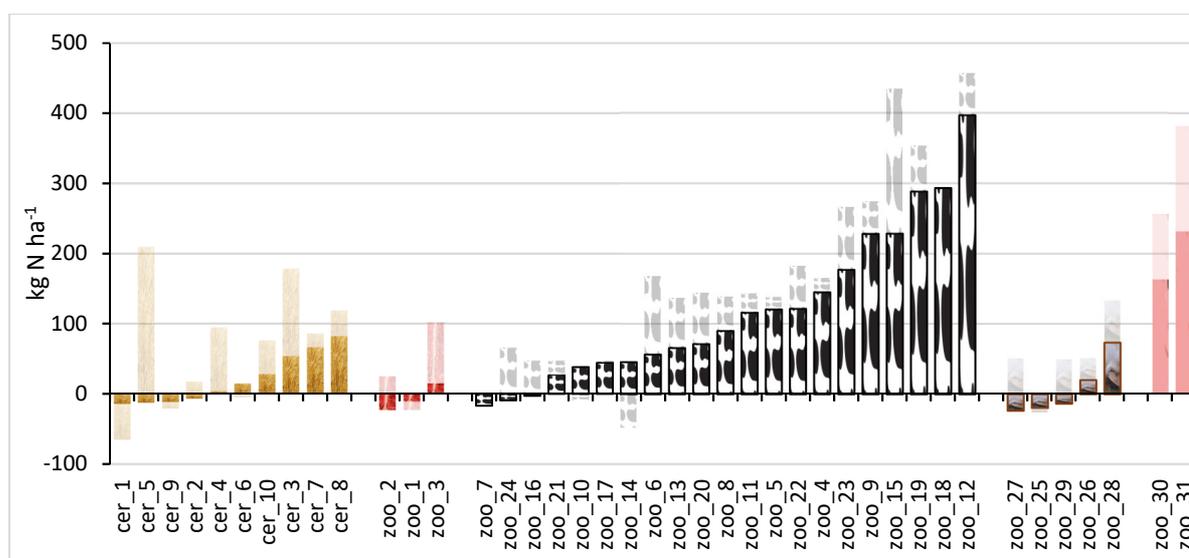


Figura 26. Risultato del processo di ottimizzazione dell'indicatore di surplus/deficit aziendale per l'azoto

In generale la figura mostra come la variabilità per l'azoto sia possibile ricondurre tutte le categorie aziendali ad un ridotto eccesso di azoto solo mediante una bilanciata concimazione minerale. Per le aziende da carne, l'indicatore ha raggiunto l'equilibrio: nel caso zoo_1 è stato necessario incrementare la concimazione azotata sul mais da granella, in quanto insufficiente. Per le aziende cerealicole l'indicatore ha evidenziato che è possibile attuare una concimazione equilibrata che né impoverisce né arricchisce il suolo: il surplus azotato medio ha^{-1} è stato ridotto del 72%. Il raggiungimento dell'equilibrio è stato possibile in quanto le aziende cerealicole non apportano quasi mai letame e, dato che l'indicatore è tarato solo sull'ottimizzazione della concimazione minerale, è stato più semplice raggiungere l'equilibrio. Le aziende cer_9 (67 kg N ha^{-1}) e cer_10 (83 kg N ha^{-1}) hanno i surplus più elevati in quanto sono tra i pochi che apportano compost in presemina. Benchè

sia stata raggiunta una condizione più omogenea, le aziende con vacche da latte rappresentano la situazione con maggiore variabilità, la quale dipende esclusivamente dall'eccessiva quantità di materiale organico apportato, originato dallo sbilanciato rapporto animale-superficie. La riduzione media della concimazione azotata è stata pari al 29%, a testimonianza che il surplus è da imputare al liquame distribuito: zoo_12 (393 kg N ha⁻¹) ha apportato nel caso di doppia coltura sino a 254 t ha⁻¹ di liquame in un anno. Per le aziende con vacche nutrici, l'indicatore ha mostrato che il piano di concimazione ottimizzato ha riportato la situazione all'equilibrio con una riduzione del surplus pari al 77%. Le aziende suinicole hanno continuato a presentare un surplus medio consistente, nonostante sia stato ridotto del 77%.

I risultati ottenuti tramite l'indicatore circa il surplus/deficit ottimizzati per il fosforo sono rappresentati in Figura (27).

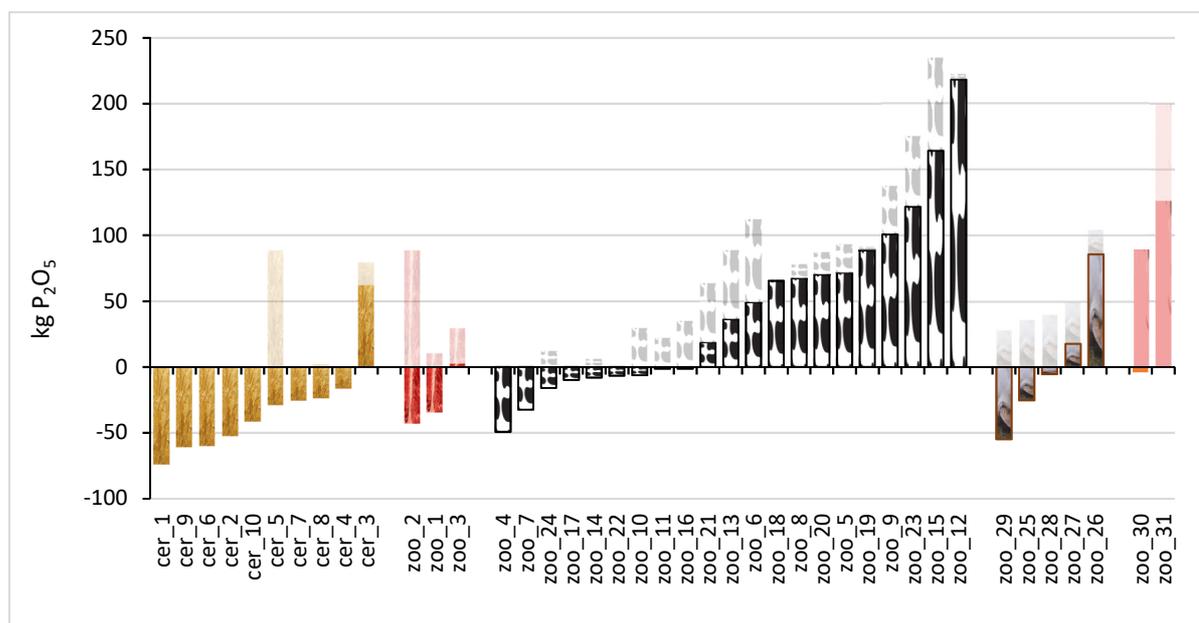


Figura 27. Risultato del processo di ottimizzazione dell'indicatore di surplus/deficit aziendale per il fosforo

Nonostante il bilancio degli elementi nutritivi riporti mediamente un surplus nelle concimazioni fosfatiche, l'indicatore ha evidenziato per le aziende con bovini da carne e cerealicole un deficit che ha raggiunto anche -74 kg P₂O₅ ha⁻¹ (cer_1). L'indicatore ha dipinto solo apparentemente una situazione negativa, in quanto i deficit erano in corrispondenza di aziende che possedevano terreni ricchi di fosforo; al fine di riportarli ad una dotazione media, è bene che le colture asportino più degli apporti. Per le aziende con vacche da latte, l'indicatore ha manifestato una considerevole eterogeneità con una riduzione complessiva del surplus medio di fosforo del 35%. I casi più critici hanno riguardato zoo_9 (101 kg P₂O₅ ha⁻¹), zoo_12 (212 kg P₂O₅ ha⁻¹) e zoo_15 (147 kg P₂O₅ ha⁻¹), in quanto oltre a presentare un surplus consistente, erano dotate di terreni con una disponibilità di fosforo molto elevata. Per le aziende con vacche nutrici, l'indicatore ha mostrato una riduzione del surplus medio pari al 77%. Solo zoo_28 (73 kg P₂O₅ ha⁻¹) era caratterizzato da un surplus fuori dalle linee, ma non grave, dato che la dotazione di questi suoli era bassa. Per le aziende suinicole, la situazione è apparsa grave in quanto, oltre al surplus evidenziato dall'indicatore, i terreni erano già ricchi di fosforo.

I risultati ottenuti tramite l'indicatore circa il surplus/deficit ottimizzati per il potassio sono rappresentati in Figura (28).

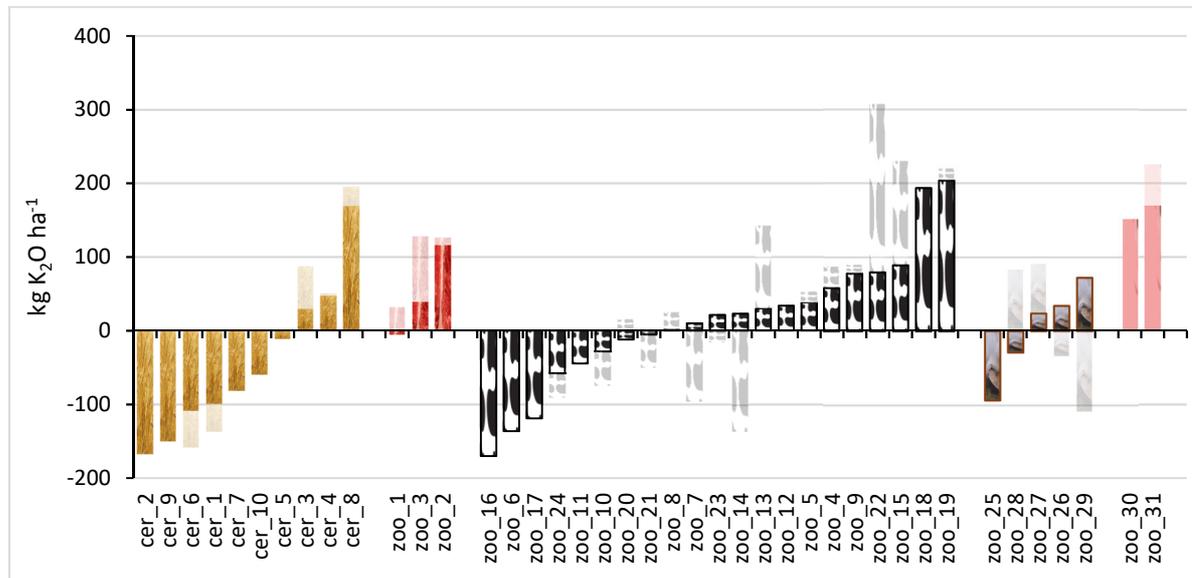


Figura 28. Risultato del processo di ottimizzazione dell'indicatore di surplus/deficit aziendale per il potassio

L'indicatore ha riportato risultati che vanno di pari passo con il fosforo. Nonostante il bilancio colturale del potassio fosse positivo, l'indicatore a livello aziendale ha denunciato situazioni di deficit sparse un po' in tutti i comparti produttivi che tuttavia vanno di pari passo con la dotazione elevata del terreno. Solo rari casi, come zoo_10 (-28 kg K₂O ha⁻¹) e zoo_17 (-119 kg K₂O ha⁻¹), hanno presentato dei deficit, sebbene la dotazione di potassio nel suolo sia bassa; si tratta di due situazioni anomale, in cui per raggiungere l'equilibrio, oltre alla normale letamazione applicata e alla distribuzione di 250 kg ha⁻¹ di cloruro di potassio, sarebbe necessario aggiungere un pari quantitativo del minerale. Al contrario, cer_8 (170 kg K₂O ha⁻¹), zoo_9 (78 kg K₂O ha⁻¹) e zoo_15 (80 kg K₂O ha⁻¹) hanno registrato un surplus di potassio, sebbene la dotazione del suolo fosse elevata. Per le aziende suinicole, l'indicatore mostra un surplus simile ma di duplice interpretazione: zoo_30 (151 kg K₂O ha⁻¹) ha terreni già ricchi di potassio, mentre zoo_31 (170 kg K₂O ha⁻¹) ha terreni poveri, si è incorso quindi in una situazione meno grave, che secondo le indicazioni agronomiche in uso in passato avrebbe richiesto una quota di arricchimento.

9.2.3. Indicatore economico

Si propone Tabella 38 in cui si descrive il potenziale risparmio medio per ciascun indirizzo produttivo alla luce del piano di concimazione ottimizzato proposto.

Tutte le situazioni in cui si è manifestata ancora la possibilità di risparmiare sono da imputare al fatto che l'indicatore economico è direttamente collegato al piano di concimazione: quest'ultimo include all'interno del surplus anche la frazione organica, che non è oggetto del processo di ottimizzazione. Il surplus riportato è pertanto da attribuire alla componente organica non ottimizzata.

Tabella 38. Indicatore sul potenziale risparmio medio nell'acquisto di concimi minerali applicando il piano di concimazione ottimizzato (€ ha⁻¹)

Indirizzo produttivo	Risparmio economico medio potenziale (€ ha ⁻¹)							
	N in urea		P ₂ O ₅ in perfosfato triplo		K ₂ O in cloruro di potassio		Totale	
	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (€ ha ⁻¹)	Err. Standard
Cerealicolo (n=10)	15	3	2	1,9	5	2	22	4
Bovini da ingrasso (n=3)	-11	12	-3	1,2	19	1	5	8
Vacche da latte (n=21)	10	3	-1	0,7	-7	3	2	7
Linea vacca-vitello (n=5)	-1	5	0	0,3	-4	5	-5	7
Suinicolo (n=2)	53	19	0	0	0	0	53	19

La Tabella 38 indica che il piano di concimazione ottimizzato ha ridotto il surplus di spesa in concimi minerali. In molte situazioni, che coinvolgono soprattutto il fosforo ed il potassio, il risparmio non è migliorabile ulteriormente. L'unica eccezione è stata rappresentata dalle aziende suinicole che, a causa di zoo_31 (72€ ha⁻¹), il cui unico apporto azotato proviene dal fosfato biammonico su mais, presenta un risparmio potenziale in urea pari a 53€ ha⁻¹.

La Tabella 39 mostra il risparmio che è stato ottenuto applicando lo scenario ottimizzato.

Tabella 39. Risparmio potenzialmente ottenibile (€ ha⁻¹) applicando il piano di concimazione ottimizzato

Indirizzo produttivo	Potenziale risparmio economico medio ha ⁻¹ ottenibile							
	N in urea		P ₂ O ₅ in perfosfato triplo		K ₂ O in cloruro di potassio		Totale	
	Risparmio medio (euro ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (euro ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (euro ha ⁻¹)	Err. Standard	Risparmio medio (euro ha ⁻¹)	Err. Standard
Cerealicolo (n=10)	29	16	17	8	7	6	53	11
Bovini da ingrasso (n=3)	28	21	22	13	10	8	60	14
Vacche da latte (n=21)	30	7	14	3	3	9	48	7
Linea vacca-vitello (n=5)	14	8	18	9	-1	20	31	15
Suinicolo (n=2)	79	9	24	24	13	13	116	46

I maggiori benefici sono stati tratti dalla riduzione della concimazione minerale azotata che si è attestata intorno ai 29€ ha⁻¹ per le aziende cerealicole, 30€ ha⁻¹ per le aziende con bovini da latte e 28€ ha⁻¹ per le aziende di bovini da ingrasso. Il risparmio per le aziende suinicole è stato di 79€ ha⁻¹, a causa dell'eccessivo impiego di urea applicato su mais. Sul potassio non sono stati evidenziati risparmi

significativi, mentre per il fosforo la riduzione di utilizzo di fosfato biammonico ha portato ad un risparmio che può raggiungere 24€ ha⁻¹ per le aziende suinicole.

9.2.4. Indicatore sull'emissione di NH₃

Si riportano i risultati circa l'emissione di ammoniaca media per indirizzo produttivo, a seguito degli interventi di ottimizzazione apportati con il nuovo piano di concimazione (Tabella 40).

Tabella 40. Indicatore sull'emissione di ammoniaca da campo ha⁻¹ ottimizzato

Indirizzo produttivo	Emissione N NH₃ da campo media kg ha⁻¹	Riduzione emissione N NH₃ da campo media kg ha⁻¹	Err. standard	€ potenzialmente risparmiabili ha⁻¹
Cerealicolo (n=10)	22	-3	11	17
Bovini da ingrasso (n=3)	65	+1	5	50
Vacche da latte (n=21)	85	-3	12	66
Linea vacca-vitello (n=5)	52	-3	12	40
Suinicolo (n=2)	97	-12	6	75

L'indicatore non ha mostrato modifiche evidenti, in quanto è la componente zootecnica che emette maggiormente. Le diminuzioni presentate sono frutto della riduzione della frazione minerale apportata: il comparto cerealicolo è infatti l'indirizzo produttivo a cui è stato applicato la maggiore riduzione, in quanto non impiega reflui zootecnici. Anche alle aziende suinicole è stato possibile ridurre del 13% le emissioni, pur rimanendo ad un valore eccessivo (97 kg N NH₃ ha⁻¹). Per le aziende con bovini non si riscontrano modifiche.

9.2.5. Indicatore sulla lisciviazione

Si riportano i risultati circa la lisciviazione media per indirizzo produttivo, a seguito degli interventi di ottimizzazione apportati con il nuovo piano di concimazione (Tabella 41).

Tabella 41. Lisciviazione media di azoto (kg N ha⁻¹) sulla base della proposta ottimizzata

Indirizzo produttivo	Media di kg N lisciviati ha⁻¹	Err. Standard
Cerealicolo (n=10)	24	5
Bovini da ingrasso (n=3)	10	3
Vacche da latte (n=21)	31	7
Linea vacca-vitello (n=5)	25	12
Suinicolo (n=2)	43	2

Benchè la lisciviazione sia stata ridotta del 34%, i suoli delle aziende suinicole lisciviano mediamente 43 kg N ha⁻¹, a causa dell'elevato surplus calcolato. Il settore in cui è stato possibile praticare la riduzione più consistente è quello di bovini da ingrasso (-55%), riportando a 10 kg N ha⁻¹ lisciviati; il massiccio impiego di azoto ureico ha permesso di poter operare ingenti tagli, soddisfacendo al tempo stesso i fabbisogni delle colture. I terreni delle aziende di vacche da latte lisciviano

31 kg N ha⁻¹ (-30%): gran parte della quota lisciviata deriva dall'azoto dei reflui zootecnici, a cui non è stato previsto di applicare un'ottimizzazione, in quanto difficilmente modificabile. Per le aziende linea vacca-vitello, è stato necessario incrementare la dose di concime minerale, al fine di soddisfare il fabbisogno colturale; ne è conseguito un incremento della lisciviazione (8%) fino a 25 kg N ha⁻¹.

9.3. Confronto tra le strategie di concimazione più comuni

9.3.1. Confronto tra le concimazioni applicate su loiessa-mais, frumento e prato stabile per indirizzo produttivo

Si riportano le concimazioni minerali ed organiche effettuate sulle colture più comuni (Tabella 42). A causa dell'esiguo numero a disposizione e del fatto che queste colture non sono di interesse per i suini, non sono state intervistate aziende suinicole con loiessa-mais e con prato stabile. Gli apporti di effluenti zootecnici sono concentrati sulla doppia coltura e avvengono nel periodo autunnale per svuotare le vasche/platee di stoccaggio in vista del periodo invernale, e ad inizio marzo per scaricare le vasche/platee colme del refluo accumulato in inverno. Nel complesso è stata evidenziata molta variabilità nella concimazione di questa doppia coltura da un minimo di 268 kg N ha⁻¹ (aziende cerealicole) ad un massimo di 728 kg N ha⁻¹ (aziende con bovini da latte). Sono le aziende con bovini da latte ad apportare un maggior quantitativo di azoto organico (495 kg N ha⁻¹), perchè da un lato producono un maggior quantitativo di liquame rispetto alle altre categorie aziendali e dall'altro la superficie agricola a disposizione per gli spandimenti non è sufficiente. Le aziende di bovini da ingrasso apportano mediamente 345 kg ha⁻¹ di azoto organico, mentre le aziende di linea vacca-vitello solo 247 kg ha⁻¹ di azoto organico, a seguito di un minor carico (t PV ha⁻¹) rispetto alle altre aziende zootecniche. Non apportando reflui, le aziende cerealicole distribuiscono i maggiori quantitativi di concime minerale (268 kg N ha⁻¹), anche se nel complesso sono la categoria che concima meno. Nonostante i 495 kg ha⁻¹ di azoto organico, le aziende con bovini da latte distribuiscono mediamente altri 233 kg ha⁻¹ di azoto minerale, apportando complessivamente 728 kg N ha⁻¹. La concimazione del frumento è sulla stessa falsa riga della loiessa-mais, anche se mediamente le concimazioni sono ridotte del 25%: l'unica differenza è rappresentata dalla concimazione estremamente spinta delle aziende suinicole, le quali, avendo a disposizione poca terra, concentrano i loro apporti (351 kg N ha⁻¹), mentre in accestimento e levata apportano ulteriori 156 kg ha⁻¹ di azoto minerale, raggiungendo una concimazione complessiva pari a 507 kg N ha⁻¹; questi apporti non giustificabili, in quanto non producono un grano di forza. Sono le aziende che ingrassano bovini a concimare di meno (155 kg N ha⁻¹).

La concimazione organica su prato è standard per tutte le categorie zootecniche ed è variabile tra 139 kg N ha⁻¹ per le aziende con i bovini da carne e 177 kg N ha⁻¹ per le aziende con vacche da latte; le aziende cerealicole concentrano 77 kg ha⁻¹ di azoto organico su questa unica coltura. Solo le aziende zootecniche apportano un'integrazione di azoto minerale al secondo taglio (30-40 kg N ha⁻¹).

Tabella 42. Concimazione organica e minerale media su loiessa-mais, frumento e prato stabile a seconda dell'indirizzo produttivo

Coltura	Indirizzo produttivo	kg N organico ha ⁻¹		kg N minerale ha ⁻¹		Totale kg N ha ⁻¹	
		Media (kg N ha ⁻¹)	Err. Standard	Media (kg N ha ⁻¹)	Err. Standard	Media (kg N ha ⁻¹)	Err. Standard
Loiessa-mais							
	Cerealicolo (n=10)	0	-	268	-	268	19
	Bovini da ingrasso (n=3)	345	123	138	44	482	-
	Vacche da latte (n=21)	495	56	233	81	728	52
	Linea vacca-vitello (n=5)	247	43	162	16	408	35
	Suinicolo (n=2)	-	-	0	-	-	-
Frumento							
	Cerealicolo (n=10)	24	19	173	5	196	32
	Bovini da ingrasso (n=3)	55	44	100	12	155	33
	Vacche da latte (n=21)	195	26	101	7	295	
	Linea vacca-vitello (n=5)	154	93	131	7	284	14
	Suinicolo (n=2)	351	-	156	-	507	-
Prato stabile							
	Cerealicolo (n=10)	77	22	0	-	77	22
	Bovini da ingrasso (n=3)	139	17	40	3	178	15
	Vacche da latte (n=21)	177	25	22	7	199	21
	Linea vacca-vitello (n=5)	171	38	23	14	194	61
	Suinicolo (n=2)	-	-	-	-	-	-

9.3.2. Il ruolo dell'effluente zootecnico e del compost nelle concimazioni: il caso di cer_8 e cer_9

La sensazione percepita durante le interviste è che la maggior parte delle aziende distribuisce i reflui non tanto perché sono una fonte di elementi nutritivi, quanto piuttosto un apporto di sostanza organica. In due occasioni, gli agricoltori stessi hanno specificato di non considerare gli apporti di compost in quanto fonte solo di sostanza organica. In altri quattro casi le aziende zootecniche reputano il refluo più come un rifiuto che un reale beneficio.

Nel complesso è apparso evidente come gli agricoltori non modulano la propria strategia di concimazione a seconda della quantità di effluente zootecnico o compost impiegati: è stato usuale riscontrare che dopo una letamazione di fondo venga distribuito in presemina cloruro di potassio o un concime ternario. Un esempio che

descrive ancora meglio la situazione è rappresentato dai casi cer_8 e cer_9, le cui aziende sono gestite dallo stesso agricoltore: l'unica differenza è che in cer_8 viene apportato anche del compost. In Tabella 43 viene riportata la strategia di concimazione adottata per le colture principali.

Tabella 43. Strategia di concimazione adottata dai casi aziendali cer_8 e cer_9 gestite dallo stesso agricoltore

Coltura	cer_8		cer_9	
	Concime minerale o organico	Dose (t o kg N ha ⁻¹)	Concime minerale o organico	Dose (t o kg N ha ⁻¹)
Frumento tenero granella	Compost	25	-	-
	nitrato ammonico 33	200	nitrato ammonico 33	200
	Urea	200	urea	200
Mais trinciato	Compost	25	-	-
	8-24-24	600	8-24-24	600
	Urea	250	urea	250
Orzo granella	Compost	25	-	-
	nitrato ammonico 33	150	nitrato ammonico 33	150
	Urea	100	urea	100

È bene sottolineare che in questa situazione il compost venga comprato; quindi l'agricoltore effettivamente percepisce un beneficio dalla sua distribuzione che tuttavia riguarda solo la struttura del suolo. La tabella mostra come la concimazione minerale non venga variata dall'agricoltore a seconda che venga distribuito o meno compost. Ad esempio, le dosi di nitrato ammonico non vengono ridotte nonostante il compost apporti circa 100 kg N ha⁻¹; la situazione più eclatante è da attribuirsi alla gestione del mais da trinciato in cui oltre a 100 kg N ha⁻¹ da compost, distribuisce 600 kg ha⁻¹ di concime ternario 8-24-24.

9.4. Impatto del *software* sugli agricoltori

In generale l'interesse manifestato dagli agricoltori circa il *software* è stato più che soddisfacente; solo in sei occasioni è stato dimostrato un certo disinteresse. Tuttavia, non sono mancati i dubbi sollevati riguardo la restituzione di alcuni risultati, soprattutto nel caso del mais: la tendenza al sovradosaggio nella concimazione fa sì che in molti casi siano restii a specifici consigli sulla quantità del concime da impiegare. La modalità di distribuzione, il frazionamento della dose e il tipo di concime (nel caso dell'azoto, se usare urea o nitrato ammonico) hanno suscitato uno spiccato interesse e attenzione. A molte delle aziende, a cui è stata fatta presente la situazione critica in cui si trovavano attraverso il confronto con aziende del medesimo indirizzo produttivo, è stata palesata la volontà di migliorare, scaturendo in loro quasi un senso di orgoglio e competizione.

L'interesse di alcuni agricoltori è stato tale da spingerli a stringere un qualche legame o collaborazione con l'università, volendo mettere a disposizione addirittura terreni da destinare alla sperimentazione, per verificare sul campo la validità del modello. In altri casi gli stessi agricoltori hanno richiesto un incontro per l'anno prossimo, al fine di poterli supportare e consigliare. In due occasioni gli agricoltori sono rimasti

sorpresi a tal punto da metterci in diretto contatto con la Coldiretti a cui fan capo: quest'ultima si è assunta l'impegno, in seguito rispettato, di fornirci i contatti di persone che potrebbero essere interessate, ampliando il nostro numero di aziende. Nel complesso si può affermare che il *software* ha riscontrato un buon successo.

10. Conclusioni

In agricoltura è sempre più necessario gestire la concimazione con soluzioni sostenibili. Negli ultimi anni, il progresso tecnologico ha permesso di sviluppare sistemi informatici volti a definire automaticamente piani di concimazione bilanciati. All'interno del progetto Monitro, l'obiettivo è duplice:

- prendere atto della gestione della fertilizzazione in Piemonte ad oggi, al fine di delineare degli indicatori agro-ambientali che possano permettere all'agricoltore di incrementare la propria efficienza;
- proporre una versione ottimizzata del piano di concimazione e dei relativi indicatori agro-ambientali.

10.1. Il piano di concimazione

Lo studio ha evidenziato che in Piemonte esistono differenze nelle strategie di fertilizzazione tra varie categorie aziendali. La gestione dell'azoto attuata dagli agricoltori all'interno delle aziende di bovini all'ingrasso è apparsa bilanciata, a seguito di un basso apporto azotato tramite i reflui zootecnici. Al contrario, le aziende suinicole, avendo ricorso ad un ampio utilizzo di liquame, hanno presentato il surplus più elevato (135 kg N ha^{-1}). Le aziende cerealicole e quelle con vacche da latte si sono collocate in una posizione intermedia. I risultati ottenuti per il fosforo ed il potassio hanno mostrato un andamento analogo, in quanto le aziende suinicole sono caratterizzate dal surplus peggiore. Le aziende cerealicole presentano il surplus più contenuto, in quanto limitano i loro apporti ai soli concimi minerali. Ad un livello intermedio si sono collocate le aziende che allevano bovini. In generale, per le aziende zootecniche si sono riscontrati surplus consistenti per due motivazioni:

- gli apporti organici ad ettaro sono eccessivi, a causa anche di un'insufficiente superficie a disposizione;
- la dotazione di elementi nutritivi dei terreni presi in analisi è elevata, per cui il fabbisogno stimato è pari a 0.

L'ottimizzazione del piano di concimazione ha permesso di riportare all'equilibrio la gestione dell'azoto, ad eccezione fatta per le aziende suinicole per le quali è rimasto un surplus di 86 kg N ha^{-1} . Per quanto riguarda il fosforo ed il potassio, l'ottimizzazione ha consentito di ridurre il surplus riscontrato in precedenza, senza però portare il bilancio all'equilibrio: il processo di miglioramento della concimazione ha riguardato solo il minerale, in quanto l'intervento sull'apporto organico è di difficile interpretazione.

10.2. Gli indicatori agro-ambientali

L'indicatore di surplus/deficit medio aziendale ha messo in relazione gli apporti minerali, organici e naturali con gli asporti. Per quanto riguarda l'azoto, le aziende di bovini all'ingrasso si sono dimostrate le più equilibrate alla luce degli interventi attuati dagli agricoltori. Le aziende con vacche da latte hanno presentato la variabilità più marcata, a causa del differente quantitativo di refluo rispetto alla superficie a disposizione, a cui si è aggiunta spesso un'integrazione col concime minerale: sono stati raggiunti surplus pari a 456 kg N ha^{-1} . Le aziende suinicole hanno registrato surplus superiori a 200 kg N ha^{-1} , mentre le aziende cerealicole non hanno mai

oltrepassato questi valori. In virtù del processo di ottimizzazione, lo scenario proposto ha riportato all'equilibrio le aziende cerealicole e quelle di bovini all'ingrasso. Nonostante sia stata abbattuta notevolmente la variabilità, le aziende con vacche da latte e quelle suinicole sono rimaste caratterizzate da surplus consistenti, a seguito degli ingenti apporti organici in campo.

Per quanto riguarda il fosforo, le aziende cerealicole, che non hanno usufruito di reflui zootecnici, hanno registrato un deficit. Gli altri indirizzi produttivi hanno rilevato dei surplus più o meno marcati, che possono comportare un rischio ambientale, se il terreno è già ricco dell'elemento nutritivo. Lo scenario proposto in virtù del processo di ottimizzazione ha appiattito solo parzialmente l'eterogeneità dei valori. Sono state riportate alcune situazioni di deficit, soprattutto nei casi di aziende con terreni caratterizzati da un'elevata dotazione di fosforo. Sono le aziende suinicole a manifestare maggiore preoccupazione, dato che oltre al surplus medio di $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ottenuto col processo di ottimizzazione, i suoli ne sono già ricchi. Per quanto riguarda il potassio, ad eccezione delle aziende suinicole, l'indicatore ha riportato situazioni sia di deficit che di surplus; le situazioni più estreme si sono evidenziate nelle aziende con bovini da latte (fino a $307 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) e in quelle suinicole (fino a $225 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). Nel complesso sono le aziende cerealicole ad esser le più equilibrate. Il processo di ottimizzazione ha ridotto solo parzialmente la variabilità e ha registrato un maggior numero di situazioni deficitarie, laddove il terreno avesse una dotazione elevata.

L'indicatore economico ha evidenziato che l'azienda suinicola potrebbe risparmiare più di tutte le altre categorie (169€ ha^{-1}), soprattutto considerando solo l'azoto (132€ ha^{-1}), se riportasse all'equilibrio il bilancio. Per le aziende cerealicole è stato previsto un risparmio potenziale medio pari a 76€ ha^{-1} , mentre per le aziende che allevano bovini sono stati stimati valori inferiori. Alla luce della proposta di ottimizzazione, l'indicatore economico non ha evidenziato risparmi potenziali medi rilevanti, a conferma del fatto che la concimazione ha raggiunto livelli efficienti. A seguito del processo di ottimizzazione, i maggiori benefici sono stati tratti dalla riduzione della concimazione minerale azotata che si è attestata intorno ai 79€ ha^{-1} per le aziende suinicole e 30€ ha^{-1} per quelle con bovini da latte. Sul potassio non sono stati registrati risparmi significativi, mentre per il fosforo, l'eccessivo impiego di fosfato biammonico, può consentire un risparmio di 24€ ha^{-1} .

L'indicatore sull'emissione di NH_3 ha riscontrato come siano sempre le aziende suinicole ($111 \text{ kg N NH}_3 \text{ ha}^{-1}$), seguite da quelle con bovini da latte ($88 \text{ kg N NH}_3 \text{ ha}^{-1}$) a rilasciare il maggior quantitativo di ammoniaca. Le aziende cerealicole risultano essere le aziende ad emettere meno ($26 \text{ kg N NH}_3 \text{ ha}^{-1}$), in quanto non impiegano reflui zootecnici. L'indicatore stesso, alla luce degli interventi di ottimizzazione, non ha riportato variazioni significative, in quanto le riduzioni applicate riguardano solo la concimazione minerale e non quella organica. Infatti, le riduzioni più evidenti sono state registrate per le aziende cerealicole (-15%).

L'indicatore sulla lisciviazione, in funzione della strategia di concimazione adottata dagli agricoltori, ha riportato come mediamente siano i terreni di proprietà delle aziende suinicole ad esser maggiormente soggetti a lisciviazione (65 kg N ha^{-1}), a seguito del maggior surplus azotato calcolato. Il picco massimo di lisciviazione è raggiunto da un'azienda cerealicola (83 kg N ha^{-1}), mentre i terreni delle aziende con bovini da latte si sono posizionati in posizione intermedia (44 kg N ha^{-1}). Alla luce della proposta di ottimizzazione, sono le aziende con bovini da ingrasso su cui è

stato possibile operare la riduzione più consistente (-55%), già peraltro le più efficienti. Benché la lisciviazione sia stata ridotta del 34%, i suoli delle aziende suinicole continuano a lisciviare 43 kg N ha⁻¹, a causa del surplus che il processo di ottimizzazione non è stato in grado di azzerare; per le aziende con vacche da latte è stata ipotizzata una riduzione della lisciviazione pari al 30%.

10.3. Confronto tra le strategie di concimazione attuate dai casi studio

Nella strategia di concimazione adottata dalle aziende esiste una certa variabilità in funzione delle colture coinvolte e dell'indirizzo produttivo. Sulla doppia coltura loiessa-mais si concentrano gli apporti di effluenti zootecnici e avvengono nel periodo tardo-autunnale e a fine febbraio. Nel complesso è stata evidenziata molta variabilità nella concimazione da un minimo di 268 kg N ha⁻¹ (aziende cerealicole) ad un massimo di 728 kg N ha⁻¹ (aziende di vacche da latte). Sono le aziende con vacche da latte ad apportare un maggior quantitativo di azoto organico. Non apportando reflui, le aziende cerealicole distribuiscono i maggiori quantitativi di concime minerale, anche se nel complesso sono la categoria che concima meno. La concimazione del frumento è simile alla loiessa-mais, anche se mediamente le concimazioni sono ridotte del 25%. Su prato stabile, la concimazione organica è standard per tutte le categorie zootecniche; le aziende cerealicole concentrano i loro apporti organici su questa unica coltura. Solo le aziende zootecniche apportano un'integrazione di azoto minerale al secondo taglio.

Per quanto riguarda la gestione della concimazione organica, è stato evidenziato che la maggior parte delle aziende distribuisce i reflui non tanto perché sono una fonte di elementi nutritivi, quanto piuttosto come un apporto di sostanza organica: non modulano la propria concimazione minerale in funzione dell'apporto organico.

10.4. Criticità del metodo di calcolo automatico del piano di concimazione

10.4.1. Eterogeneità delle aziende

L'eterogeneità delle aziende presenti sul territorio regionale comporta notevoli difficoltà per lo sviluppo di un *software* che sia in grado di considerare tutte le variabili: ciascuna azienda rappresenta spesso un caso a sé, dovuto ad una particolare pratica di lavorazione o ad una coltura specifica. Ad esempio, l'introduzione di colture esotiche, come la quinoa, di cui non si hanno sufficienti dati bibliografici circa il contenuto di azoto, fosforo e potassio, pone di fronte a limiti talvolta difficili da superare relativi al calcolo dell'asporto.

L'ampio spettro di concimi minerali utilizzati in ciascuna azienda, il cui mercato è in continua evoluzione con l'entrata in commercio di nuovi formulati, non permette di rendere automatizzabile fino in fondo il processo. A tal fine sono stati inseriti nel File Excel, *Monitro.xlsx*, dei *records* che consentono di inserire il nuovo formulato, che a quel punto il *software* potrà assorbire nei suoi calcoli.

È stato necessario integrare queste specifiche peculiarità aziendali di volta in volta e questo processo di completamento è in atto tuttora, al fine di realizzare un *software* finito o quantomeno rappresentativo dell'areale regionale.

10.4.2. Modulazione del fosforo e del potassio

Un problema sorto durante lo sviluppo del bilancio del fosforo e del potassio ha riguardato la definizione del coefficiente che modula il fabbisogno della coltura in base alla dotazione dell'elemento nutritivo nel suolo. La logica adottata in questa tesi è stata riassunta in Tabella 26 per il fosforo e in Tabella 27 per il potassio. Le quattro macro-classi adottate risultano essere ancora troppo grezze e poco selettive. Continuando a rispettare i criteri delineati in precedenza e in attesa che le dinamiche di questi due elementi nutritivi nel suolo siano più chiare, sarebbe opportuno esprimere una modulazione, come rappresentata in Figura 29 e 30:

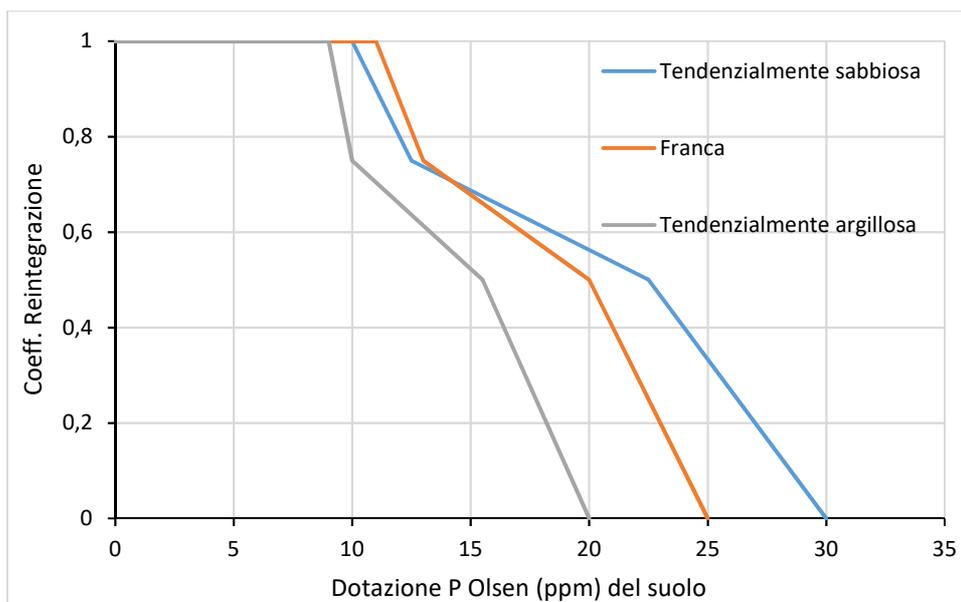


Figura 29. Proposta di un nuovo coefficiente di reintegrazione della concimazione fosfatica in base alla dotazione e alla tessitura del suolo

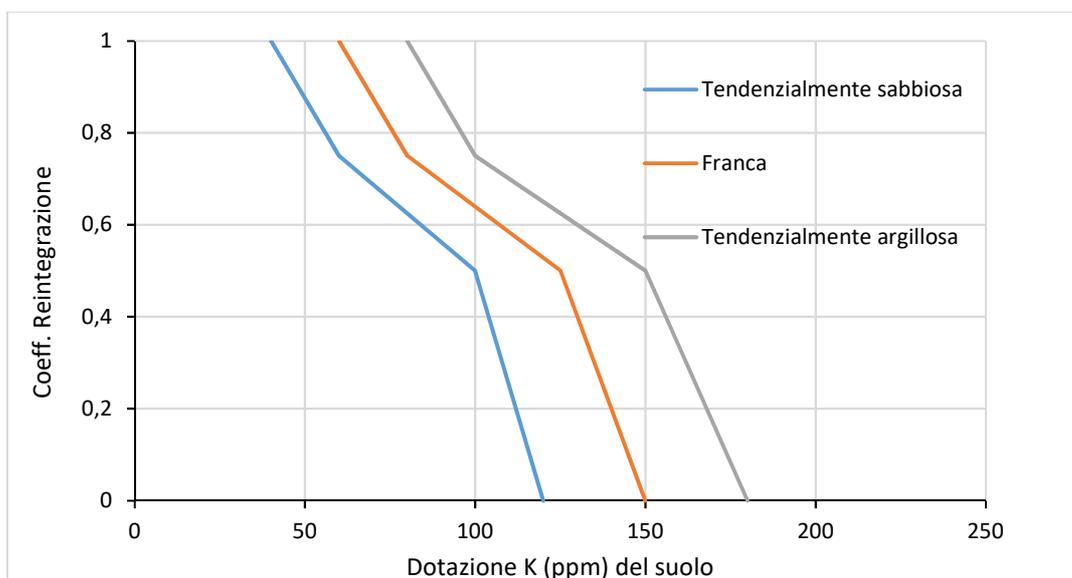


Figura 30. Proposta di un nuovo coefficiente di reintegrazione della concimazione potassica in base alla dotazione e alla tessitura del suolo

I due grafici riportano la modulazione del fosforo e del potassio sulla base dei criteri che sono stati delineati nel paragrafo 8.3.7: la differenza consiste nella modulazione

proporzionale del coefficiente di reintegrazione con la dotazione dell'elemento nutritivo nel suolo, rispetto alla più schematica suddivisione adottata del coefficiente in quattro classi.

10.4.3. Discriminazione delle buone pratiche agricole

Un problema sorto durante lo sviluppo di Monitro.xlsx riguarda l'impossibilità di poter discriminare i coefficienti di efficienza dei concimi a seconda che vengano attuate o meno delle pratiche virtuose, quali ad esempio l'interramento del liquame, del digestato o dell'urea. Il motivo è da attribuirsi al fatto che, al fine di mantenere un legame con i calcoli presenti nella normativa regionale 10/R/2007, bisogna seguire le linee guida dei regolamenti regionali dipendenti direttamente dalle direttive europee, le quali non prevedono una distinzione dell'efficienza per i casi descritti in precedenza. In futuro occorrerà accordarsi su normative che includano anche le buone pratiche agricole.

10.5. Sviluppi futuri

Il software nasce con l'intenzione di ridurre i surplus e gli sprechi a cui oggi si assiste, attraverso un miglioramento delle strategie di concimazione ed un processo di sensibilizzazione dell'agricoltore. In futuro lo sviluppo di un'applicazione permetterà all'agricoltore di usufruirne a titolo gratuito, comportando benefici su:

- scala aziendale, in quanto consente un risparmio economico, ma anche logistici, soprattutto nei tempi, dato che la riduzione delle concimazioni minerali limiterà il numero dei passaggi in campo;
- su scala territoriale, in quanto il suo impiego in Piemonte comporterà notevoli vantaggi ambientali.

È bene sottolineare che il *software* necessita della figura di un agronomo, il quale sia in grado di interpretare correttamente gli output dell'applicazione, dato che rimane pur sempre uno strumento che non considera tutte le variabili e che deve essere ben gestito.

L'applicazione potrà rivestire il ruolo di attore attivo in grado di aiutare a risolvere parte delle problematiche attuali che vedono l'agricoltura protagonista per lo più ingiustificato nelle cronache di oggi.

11. Bibliografia

- Acutis M., Alfieri L., Giussani A., Provolo G., Di Guardo A., Colombini S., Bertoncini G., Castelnuovo M., Sali G., Moschini M., Sanna M., Perego A., Carozzi M., Chiodini M. E., Fumagalli M., 2014. *ValorE: An integrated and GIS-based decision support system for livestock manure management in the Lombardy region (northern Italy)*. Land use policy, 41, 149-162.
- Adenuga, A.H., Davis, J., Hutchinson, G., Donnellan, T., Patton, M., 2018. *Estimation and determinants of phosphorus balance and use efficiency of dairy farms in Northern Ireland: A within and between farm random effects analysis*. Agricultural Systems, vol 164, 11-19.
- Ahmad, R., Jilani, G., Arshad, M., Zahir, Z.A., Khalid, A., 2007. *Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects*. Ann. Microbiol. 57, 471–479.
- Ahmed N., Abid M., Ahmad F., Ullah M.A., Javaid Q., Ali M.A., 2011. *Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton*. Pak. J. Bot. vol. 43, 2903–2910.
- Amery, F., Schoumans, O. F., 2014. *Agricultural phosphorus legislation in Europe*. Merelbeke, ILVO, 45.
- Arregui, L. M., Quemada, M., 2008. *Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions*. Agronomy Journal, 100, 277-284.
- Bassanino, M., Grignani, C., Sacco, D., Allisiardi, E., 2007. *Nitrogen balances at the crop and farm-gate scale in livestock farms in Italy*. Agriculture, Ecosystems and Environmental 122, 282-294.
- Basso B., Ritchie J. T., 2005. *Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan*. Agr. Ecosyst. Environ. 108, 329–341.
- Battisti, 2017. *Stato e variazione del contenuto di fosforo nei suoli del Piemonte*. Tesi magistrale, Università degli Studi di Torino.
- Benton Jones, J., 1997. *The Micronutrients*. In: *Manual Plant Nutrition*. CRC Press LLC, 55-74
- Blandino, M., Mancini, M. C., Marinaccio, F., Sovrani, V., Reyneri, A., 2011. *Mais: più rese anticipando la fioritura*. L'Informatore Agrario, 9, 50-53.
- Blandino, M., Testa, G., 2015. *Più mais con la concimazione fosfo-azotata localizzata*. L'Informatore Agrario, 19, Supplemento Agricoltura e Fertilizzanti, 20-22. 12.
- Blandino, M., Borio, A., Gilardi, M., Reyneri, A., 2018. *Qualità dei frumenti di forza: come gestire l'azoto*. L'Informatore Agrario, 15, 44-48.
- Borda, T., Celi, L., Zavattaro, L., Sacco, D., Barberis, E., 2011. *Effect of agronomic management on risk of suspended solids and phosphorus losses from soil to waters*. Journal of Soil and Sediment, 11, 440-551.

Cavani L., de Biase, G., Ciavatta C., 2008. *Mineralizzazione di concimi a base di pellicino integrato: azoto minerale, attività enzimatica e biomassa microbica*. L'Informatore Agrario, 13, 64-69.

Cesarano, G., De Filippis, F., La Storia, A., Scala, F., Bonanomi, G., 2017. *Organic amendment type and application frequency affect crop yields, soil fertility and microbiome composition*. Appl. Soil Ecol., 120, 254-264

Ceccon, P., Fagnano, M., Grignani, C., Monti, M., Orlandini, S., 2017. *Interventi sulle caratteristiche chimiche e biologiche del suolo: fertilizzazione*. In: *Agronomia*. EdiSES, 279-319.

Celi, L., Bonifacio, E., 2016. *Fertilità del suolo e disponibilità dei nutrienti in Fertilizzazione sostenibile*. Principi, tecnologie ed esempi operativi a cura di Carlo Grignani, Edagricole, Bologna, 5, 121-164.

Chen, H., Fan, X., 2018. *Effects of magnesium remobilization and allocation on banana plant growth*. Journal of Plant Nutrition, vol. 41, 1312-1320.

Cheng, J. H., Tang, X. Y., Cui, J. F., 2019. *Effect of long-term manure slurry application on the occurrence of antibiotic resistance genes in arable purple soil (entisol)*. Science of the Total Environment, Vol. 647, 853-861.

Ciuffreda, G., 2017. *Cosa sapere sulla concimazione potassica*. L'informatore Agrario, 39, Supplemento Agricoltura e Fertilizzanti, 10-13.

Clap, C.E., Hayes, M.H.B., Ciavatta, C., 2007. *Organic wastes in soils: Biogeochemical and environmental aspects*. Soil Biol. Biochem. 39(6), 1239-1243.

Cooper, J.M., Burton, D., Daniell, T.J., Griffiths, B.S., Zebarth B.J., 2011. *Carbon mineralization kinetics and soil biological characteristics as influenced by manure addition in soil incubated at a range of temperatures*. Eur. J. Soil Biol., 47, 392-399.

Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75. *“Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88”*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Decreto Ministeriale 25 febbraio 2016. Revisione del Decreto Ministeriale 7 aprile 2006.

Decreto Ministeriale 7 aprile 2006. *“Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento, di cui all'articolo 38 del D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152”*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Del Amor, F.M., Cuadra-Crespo, P., 2011. *Gas exchange and antioxidant response of sweet pepper to foliar urea spray as affected by ambient temperature*. Sci. Hortic., 127, 334-340.

Dell, C. J.; Kleinman, P. J.; Schmidt, J. P.; Beegle, D. B., 2012. *Low-disturbance manure incorporation effects on ammonia nitrate loss*. Journal of Environmental Quality, vol 41, p.928-937.

Direttiva 91/676/CEE del Consiglio, del 12 dicembre 1991, relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole. Gazzetta ufficiale n. L 375 del 31/12/1991.

Dobermann A., Fairhurst T. (2000). *Rice: nutrient disorders and nutrient management*. Potash and Phosphate Institute of Canada and International Rice Research Institute, Makati City & Singapore.

DPGR n. 10/R del 29/10/2007. Regolamento regionale recante: 'Disciplina generale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti zootecnici e delle acque reflue e programma di azione per le zone vulnerabili da nitrati di origine agricola. B.U. 31 ottobre 2007, n. 44.

Fangueiro, D., Pereira, J., Coutinho, J., Moreira, N., Trindade H., 2008. *NPK farm-gate nutrient balances in dairy farms from Northwest Portugal*. European Journal of Agronomy, vol 28, 625-634.

FAOSTAT, 2017. FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Fassio, A., Giupponi, C., Hiederer, R., Simot, C., 2005. *A decision support tool for simulating the effects of alternative policies affecting water resources: an application at the European scale*. J. Hydrol. 304, 462–476.

Fracciolla, M., Lasorella, C., Laudadio, V., Cazzato, E., 2018. *Trifolium mutabile as New Species of Annual Legume for Mediterranean Climate Zone: First Evidences on Forage Biomass, Nitrogen Fixation and Nutritional Characteristics of Different Accessions*. Agriculture 2018, 8, 113.

Fumagalli, m., Acutis, M., Mazzetto F., Vidotto F., Sali, G., Bechini, L., 2011. *An analysis of agricultural sustainability of cropping systems in arable and dairy farms in an intensively cultivated plain*. European Journal of Agronomy, vol 34, 71-82.

Gaudino, S., Goia, I., Grignani, C., Monaco, S., Sacco, D., 2014. *Assessing agro-environmental performance in dairy farms in northwest Italy based on aggregated results from indicators*. Journal of Environmental Management 140, 120-134.

Giardini, L., 2012. *Sostanza organica e fertilizzanti organici*. In: *L'agronomia per conservare il futuro*. Patron Editore Bologna., 396-410.

Giardini, L., 2012. *Concimi minerali e concimazione*. In: *L'agronomia per conservare il futuro*. Patron Editore Bologna., 431-496.

Giardini, L., 2004. *Produzioni areiche*. In: *Potenzialità produttiva e sostenibilità dei sistemi colturali*. Patron Editore Bologna., 141-149.

Giro, A., Sambo, P., 2018. Evoluzione tecnologica al servizio della fertirrigazione. L'informatore Agrario, 22, 41-44.

Grigatti, M., Di Girolamo G., Chiancarini, R., Barbanti L., Ciavatta, C., 2011. *Potential nitrogen mineralization, plant utilization efficiency and soil CO₂ emissions following the addition of anaerobic digested slurries*. Biomass and Bioenergy, 35(11), 4619-4629.

Grignani, C., 2016. *Fertilizzanti: commodities e nuove tipologie*. In: *Fertilizzazione sostenibile. Principi, tecnologie ed esempi operativi*. Edagricole., 9-46.

Grignani, C., Bassanino, M., Sacco, D., Zavattaro, L., 2003. *Il bilancio degli elementi nutritivi per la redazione del piano di concimazione*. Rivista Agronomica, 37, 155-172.

Grignani, C., Bertora, C., Zavattaro, L., 2013. *Gestione della nutrizione vegetale in Agricoltura sostenibile. Principi, sistemi e tecnologie applicate all'agricoltura produttiva per la salvaguardia dell'ambiente e la tutela climatica a cura di Michele Pisante*. Edagricole, Bologna, 7, 153-179.

Gómez-Brandón, M., Juárez, M., Domínguez, J., Insam H., 2013. *Animal manures: recycling and management technologies*. Biomass Now – Cultiv. Util., 237-272.

Grujicic, D., Drinic, M., Zivanovic, I., Cakmak, I., Singh B.R., 2018. *Micronutrient availability in soils of Northwest Bosnia and Herzegovina in relation to silage maize production*. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science, vol. 68, 301-310.

He, Y., Xu, C., Gu, F., Wang, Y., Chen, J., 2018. *Soil aggregate stability improves greatly in response to soil water dynamics under natural rains in long-term organic fertilization*. Soil and Tillage Research, vol 184, 281-290.

He, Y.T., Zhang, W.J., Xu, M.G., Tong, X.G., Sun, F.X., Wang, J.Z., Huang, S.M., Zhu, P., He, X.H., 2015. *Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China*. Sci. Total Environ., 532,635-644

Hobley, E.U., Honermeier, B., Don, A., Gocke, M.I., Amelung, W., Kögel-Knabner, I., 2018. *Decoupling of subsoil carbon and nitrogen dynamics after long-term crop rotation and fertilization*. Agriculture, Ecosystems and Environment, vol 265, 363-373.

Huang, T., Ju, X., Yang H., 2017. *Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management*. Scientific Reports, 7, 42247

locoli, G.A., Zabaloy M.C., Pasdevicelli, G., Gómez, M.A., 2019. *Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: Characterization, soil biological activity and growth dynamic of Lactuca sativa L*. Science of The Total Environment, vol 647, 11-19.

Jiang, G., Xu, M., He X., Zhang, W., Huang, S., Yang, X., Liu, H., Peng, C., Shirato, Y., Iizumi, T., Wang, J., Murphy D.V., 2014. *Soil organic carbon sequestration in upland soils of northern China under variable fertilizer management and climate change scenarios*. Glob. Biogeochem. Cycles, 28, 319-333.

Ju XT, Xing GX, Chen XP, Zhang SL, Zhang LJ, Liu XJ, Cui ZL, Yin B, Christie P, Zhu ZL, Zhang FS, 2009. *Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106, 3041–3046.

- Kallenbach, C.M., Frey, S.D., Grandy, A.S., 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat. Commun.*, 13630.
- Karmakar, S., Ketia, M., Laguë, C., Agnew, J., 2010. *Development of expert system modeling based decision support system for swine manure management*. *Comput. Electron. Agric.* 71, 88–95.
- Khatun M.A., Hossain, M.M., Bari, M.A., Abdullahil, K.M., Parvez, M.S., Alam, M.F., Kabir A.H., 2018. *Zinc deficiency tolerance in maize is associated with the up-regulation of Zn transporter genes and antioxidant activities*. Research Paper
- Kucke, M., Kleeber, P., 1997. *Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions*. *Eur. J. Agron.* 6, 89-100.
- Kunz, A., Miele, M., Steinmetz R.L.R., 2009. *Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil*. *Bioresour. Technol.*, 100, 5485-5489.
- Lægroid, M., Bøckman, O. C., Kaarstad, O., 1999. *Concerns related to fertilizer use*. In: *Agriculture Fertilizers and the Environment*. Cabi Publishing, 113-157.
- Leite, L.F.C., et al., 2010. *Soil organic carbon and biological indicators in an Acrisol under tillage systems and organic management in north-eastern Brazil*. *Soil Res.* 48, 258–265.
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., Song, Z., Cooper J.M., Zhao, B., 2018. *Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain*. *Soil and Tillage Research*, vol. 175, 281-290.
- Limam, R.D., Limam, I., Clérandeau, C., Khouatmia, M., Djebali, W., Cachot, J., Chouari, R., 2018. *Assessment of the toxicity and the fertilizing power from application of gamma irradiated anaerobic sludge as fertilizer: Effect on Vicia faba growth*. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 150, 163-168.
- Linee Guida Nazionali di Produzione Integrata 2018. Rev. 2 del 25 10 2017.
- Liu, J., Kleinman, P.J.A., Beegle, D.B., Dell, C.J. Veith, T.L., Saporito, L.S., Han, K., Pote, D., Bryant, R.B., 2016. *Subsurface application enhances benefits of manure redistribution*. *Agric. Environ. Lett.*, 1 (2016), Article 150003.
- Mambro, A., 2017. *Il nuovo regolamento non convince industria e agricoltori*. *L'Informatore Agrario*, Supplemento Speciale num. 1, 39, 6-7.
- Marandola, D., 2017. *Uso sostenibile del suolo: priorità per le politiche, sfida per gli agricoltori*. *L'Informatore agrario*, Supplemento Speciale num. 1, 45, 9-13.
- Marcellino, 2018. *Sviluppo di un'applicazione per la stima delle emissioni gassose di aziende agricole*. Tesi magistrale, Università degli Studi di Torino.
- Marzadori, C., Giacometti, C., Ciavatta, C., 2008. *Biomasse ricche di azoto come concimi a lenta cessione*. *Fertilizzare oggi*, Suppl. Terra e vita, 31-32, 24-26.

Masi, V., 2009. *Il controllo dei sistemi di aerazione negli impianti a fanghi attivi finalizzato all'ottimizzazione dei consumi energetici e dei processi biologici*. Tesi magistrale, Università degli Studi di Bologna, 12.

Mazzocchi, C., Sali, G., Corsi, S., 2013. *Land use conversion in metropolitan areas and the permanence of agriculture: Sensitivity Index of Agricultural Land (SIAL), a tool for territorial analysis*. Land Use Policy 35, 155–162.

Meade, G.; Pierce, K.; O'Doherty, J. V.; Mueller, C.; Lanigan, G.; McCabe, T. M., 2011. *Ammonia and nitrous oxide emissions following land application of high and low nitrogen pig manures to winter wheat at three growth stages*. Agriculture, Ecosystems & Environment, v.140, p.208-217.

Melo, W., Delarica, D., Guedes, A., Lavezzo, L., Donha, R., de Araújo, A., de Melo, G., Macedo, F., 2018. *Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality*. Science of the Total Environment, vol 643, 1493-1501.

Menšík, L., Hlišnikovský, L., Pospíšilová, L., Kunzová, E., 2018. *The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment*. Journal of Soils and Sediments, vol 18, 2813-2822.

Mescalchin, E., Zanzotti, R., 2018. *Sovescio in viticoltura, una fonte di sostanza organica*. L'informatore Agrario, 22, 50-53.

Min J., Zhang H., Shi W., 2012. *Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production*. Agr. Water Manage, 111, 53-59.

Moretti, B., Sanino, N., Remogna, E., Zavattaro, L., Bruno, G., Grignani, C., Borda, T., Lerda, L., De Luca, G., Barberis, E., Celi, L., Tivano, P., Surra, E., Bonino, M., Sacco, D., 2014. *Le buone pratiche di fertilizzazione*. Schede tecniche di assistenza, Regione Piemonte.

Muller A., Ferré M., Engel S., Gattinger A., Holzkämper A., Huber R., Six J. (2017). *Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture?* Land Use Policy, 69, 102–105.

Munkholm, L.J., Schjonning, P., Deboz, K., Jensen, H.E., Christensen B.T., 2012. *Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments*. Eur. J. Soil Sci., 53 (2002), 129-137.

Necpalova, M., Lee, J., Skinner, C., Büchi, L., Wittwer, R., Gattinger, A., van der Heijden, M., Mäder, P., Charles, R., Berner, A., Mayer, J., Six, J., 2018. *Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture*. Agriculture, Ecosystems and Environment, vol 265, 84-102.

Nicholson, F.A., Bhogal, A., Chadwick, D., Gill, E., Gooday, R.D., Lord, E. Misselbrook, T., Rollett, A.J., Sagoo, E., Smith, K.A., Thorman, R.E., 2013. *An enhanced software tool to support better use of manure nutrients: MANNER-NPK*. Soil Use and Management, 29, 473–484.

Nicoulaud, B.A.L., Bloom, A.J., 1996. *Absorption and assimilation of foliarly applied urea in tomato*. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 121, 1117-1121.

Nkoa, R., 2013. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 34 (2), 473-492.

Norme Tecniche di Produzione Integrata della Regione Piemonte 2018. Determinazione dirigenziale n. 230 del 14 febbraio 2018

Otalora, G., Pinero, M.C., Lopez-Marin, J., Varo, P., del Amor, FM, 2018. *Effects of foliar nitrogen fertilization on the phenolic, mineral, and amino acid composition of escarole (Cichorium endivia L. var. latifolium)*. *Scientia Horticulturae*, vol. 239, 87-92.

Perez-de-los-Reyes P., Amoros Ortiz-Villajos, J.A., Garcia Navarro, F.J., Bravo Martin-Consuegra, S., Sanchez Jimenez, C., Chocano Eteson, D., Jimenez-Ballesta, R., 2011. *Changes in water retention properties due to the application of sugar foam in red soils* *Agric. Water Manage.*, 98 (2011), 1834-1839.

Perini, A., Susi, A., 2004. *Developing a decision support system for integrated production in agriculture*. *Environ. Model. Softw.* 19, 821–829.

Petersen, S.O., Sommer, S.G., Béline, F., Burton, C., Dach, J., Dourmad, J.Y., Leip, A., Misselbrook, T., Nicholson, F., Poulsen, H.D., 2007. *Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective*. *Livest. Sci.* 2007, 112, 180–191.

Pišanová, J., Růžek, P., 2007. *15th N Workshop Towards a better efficiency in N use*. Atti Conv. "Influence of urease and nitrification inhibitors on the utilization of nitrogen from applied mineral fertilizer". 28-30 Maggio, Lleida. 16.

Power, D.J., 1997. *What is a SSD? Online Exec.* *J. Data Intensive Decis. Support* 1 (3).

Provolo, G., 2012. *Gli effluenti di allevamento*. In: *Effluenti zootecnici, Impiantistica e soluzioni tecnologiche per la gestione sostenibile*. Maggioli Editore, 39-103.

Provolo, G., Manuli, G., Finzi, A., Lucchini, G., Elisabetta Riva, E., Sacchi, G.A., 2018. *Effect of Pig and Cattle Slurry Application on Heavy Metal Composition of Maize Grown on Different Soils*. *Sustainability*, 10(8), 2684.

Raboin, L.M., Razafimahafaly, A.H.D., Rabenjarisoa, M.B., Rabary, B., Dusserre, J., Becquer T., 2016. *Improving the fertility of tropical acid soils: liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar*. *Field Crop Res.*, 199, 99-108.

Ramieri N.A., Marzadori, C., Ciavatta, C., 2004. *Ruolo della temperatura sui concimi a base di gelatina per uso agricolo*. *L'Informatore Agrario*, 37, 35-38.

Regolamento (CE) N. 2003/2003 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 13 ottobre 2003 relativo ai concimi, (Testo rilevante ai fini del SEE).

Relazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo del 4 maggio 2018 sull'applicazione della direttiva 91/676/CEE del Consiglio relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole, elaborata in base alle relazioni presentate dagli Stati membri per il periodo 2012-2015, 1-15.

- Ren, F., Zhang, X., Liu, J., Sun, N., Sun, Z., Wu, L., Xu, M., 2018. *A synthetic analysis of livestock manure substitution effects on organic carbon changes in China's arable topsoil*. *Catena*, vol 171, 1-10.
- Reijneveld, J. A., Ehlert, P. A. I., Termorshuizen, A. J., Oenema, O., 2010. *Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century*. *Soil Use and Management*, 26, 399-411.
- Riparbelli C., Cambareri, M.N., Pastori M., Brenna, S. *Water quality management in agriculture: the case of lombardy - North Italy. Management of Intentional and Accidental Water Pollution*. 8 - 11 May 2005, Sofia, Bulgaria. NATO Security to Science Series: Environment series. 211-230 pp. G.Dura et al. (eds.). Springer NL, 2006.
- Riparbelli, C., Di Guardo, A., Serrano, A., Capri, E., Brenna, S., 2008. In: Sánchez-Marrè, M., Béjar, J., Comas, J., Rizzoli, A., Guariso, G. (Eds.), *Sustainable Use of Pesticides: an Innovative Experience in Lombardy Region, Italy*. 4th Biennial Meeting of iEMSs. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs).
- Roitero, M., 2010. *Achieving the Nitrate Directive: field measurements and simulation approach*. Tesi dott., Università degli Studi di Padova, 62 pp.
- Rustioni, L., Grossi, D., Brancadoro, L., Failla, O., 2018. *Iron, magnesium, nitrogen and potassium deficiency symptom discrimination by reflectance spectroscopy in grapevine leaves*. *Scientia Horticulturae*, vol. 241, 152-159.
- Sacco, D., Bassanino, M., Grignani, C., 2003. *Developing a regional agronomic information system for estimating nutrient balances at a larger scale*. *Europ. J. Agronomy* 20, 199-210.
- Sainju, U.M., 2017 *Determination of nitrogen balance in agroecosystems*. *MethodsX*, vol 4, 199-208.
- Shireen, F., Nawaz, M.A., Chen, C., Zhang, Q., Zheng, Z., Sohail, H., Sun, J., Cao, H., Huang, Y., Bie, Z., 2018. *Boron: Functions and Approaches to Enhance Its Availability in Plants for Sustainable Agriculture*. *Int J Mol Sci*, vol. 19(7): 1856.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., Bechmann, M.E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., Rubaek, G.H., Ulén, B., Dorioz, J.-M., 2014. *Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review*. *Science of the Total Environment* 468-469, 1255-1266.
- Singh, U., 2006. *Integrated Nitrogen Fertilization for Intensive and Sustainable Agriculture*. *Journal of Crop Improvement*, Vol. 15, 259-288.
- Sommer, S.G., Christensen, M.L., Schmidt, T., Jensen, L.S., 2013. *Animal Manure Recycling: Treatment and Management*. John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK.
- Sørensen, C.G., Jacobsen, B.H., Sommer, S.G., 2003. *An assessment tool applied to manure management systems using innovative technologies*. *Biosyst. Eng.* 86,315.
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M., 2009. *Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity*. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 1301-1310.

Tabacco, E, Comino, L., Borreani, G., 2018. *Production efficiency, costs and environmental impacts of conventional and dynamic forage systems for dairy farms in Italy*. European Journal of Agronomy, vol 99, 1-12.

Tei, F., Nicola, S., Benincasa, P., 2017. *The Role of Research for a Sustainable Fertilization Management*. In: *Advances in Research on Fertilization Management of Vegetable Crops*. Springer, 1-65.

Tilman, D., Cassman K. G., Matson P. A., Naylor R., Polasky, S., 2002. *Agricultural sustainability and intensive production practices*. Nature (London) 418:671–677.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B., 2011. *Global food demand and the sustainable intensification of agriculture*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 108, 20260-20264.

Watts, D.B., Torbert, H.A., Prior, S.A., Huluka, G., 2012. *Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility*. Soil. Sci. Soc. Am. J., 74,1239-1247.

Wood B. W., 2013. *Iron-induced nickel deficiency in pecan*. HortScience vol.48, 1145–1153.

Yetilmezsoy, K., Sapci-Zengin Z., 2009. *Recovery of ammonium nitrogen from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as a slow release fertilizer*. Journal of Hazardous Materials, vol. 166, 260-26.

Zaks, D.P., Winchester, N., Kucharik, C.J., Barford, C.C., Paltsev, S., Reilly, J.M., 2011. *Contribution of anaerobic digesters to emissions mitigation and electricity generation under U.S. climate policy*. Environ. Sci. Technol., 45 (16), 6735-6742.

Zaman, M.; Saggari, S.; Blennerhassett, J. D.; Singh, J., 2009. *Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system*. Soil Biology & Biochemistry, v.41, p.1270-1280.

Zhao, S., He, P., Qiu, S., Jia, L., Liu, M., Jin, J., Johnston, A.M., 2014. *Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China*. Field Crop. Res., 169, 116-122.

12. Sitografia

<https://www.alamy.it>

<http://www.fao.org/faostat>

www.federchimica.it/webmagazine/dettaglio-news/2017/10/13/global-fertilizer-day-2017-il-contributo-fertilizzanti-per-la-lotta-alla-fame-nel-mondo

www.fertilizer.org

<http://www.kali-gmbh.com>

www.merateonline.it

<https://www.yara.it/nutrizione-delle-colture>

Ringraziamenti

Finalmente o per sfortuna, dipende dai punti di vista, siamo arrivati al termine di questo lungo percorso. Dico “siamo” perché, nonostante sia io ad aver scritto la tesi con le mie manine e a essermi presentato fisicamente agli esami, in realtà i risultati conseguiti sono il frutto di un supporto e una collaborazione da parte della mia famiglia e dai miei amici.

Desidero ringraziare il relatore di questa tesi, il Prof. Carlo Grignani per aver dispensato suggerimenti indispensabili durante il corso dei nostri brevi ma intensi incontri. Sono rimasto colpito per la continua disponibilità e per il lato umano, valori che al giorno d’oggi non appartengono a molte persone.

Desidero ringraziare la Dott.ssa Laura Zavattaro, correlatrice di questo lavoro e dispensatrice di consigli; non solo il tuo supporto in questi mesi si è dimostrato essenziale, ma attraverso la tua esperienza mi hai insegnato ad affrontare le difficoltà incontrate senza demordere mai.

Desidero ringraziare la Dott.ssa Battisti, meglio conosciuta come “Chicca”, per gli amici “Mich” o forse più semplicemente “Borsista”. Sono talmente tanti i soprannomi usati che non ricordo più il tuo nome! Sei stata onnipresente, non solo come guida, ma soprattutto come amica, grazie!

Desidero ringraziare la mia famiglia, mamma Sandra, papà Roberto, il mio fratellino Luca, zio Dario, zia Isolabella, zio Michele e il mio cuginetto super atletico Kamil per il sostegno fornitomi durante questi lunghi, e fidatevi lunghi, anni.

Ringrazio tutti i miei compagni di avventura Agnese, Greta, Vincenzo, Andrea (qualora me ne fossi dimenticato qualcuno, l’interlinea mi permetterà di aggiungerli manualmente!) che col tempo si sono trasformati in amici fedeli e sinceri.

Ringrazio tutti i miei amici, da Mattia a Mattia, da Alessia a Alessia, amici con la A maiuscola, ma non crediate di essere più importanti degli altri che non ho citato (i vostri nomi mi hanno permesso di creare questo gioco circolare!).

Desidero ringraziare per ultima, nonchè la più importante, la Dott. Pelli, compagna di vita e mio angelo custode. Quanta pazienza che hai avuto con me tra una pizza e l’altra non solo in questi mesi, ma in questi anni! Però sai... ne vale proprio la pena!