



**IMPATTI A SCALA
COMPRENSORIALE
DEGLI IMPIANTI DI BIOGAS
E PROBLEMATICHE AGRONOMICHE**

CONVENZIONE QUADRO Regione Lombardia - E.R.S.A.F.
(approvata con delibera n. 2211 del 29/03/2006)

PROGRAMMA ANNUALE Anno 2008
(approvato con DCR n. 6594 del 20/02/2008)

RENDICONTAZIONE FINALE

**IMPATTI A SCALA COMPRESORIALE DEGLI IMPIANTI DI BIOGAS
E PROBLEMATICHE AGRONOMICHE
Anno 2008**

Riferimento obiettivo Programma ERSAF:

Obiettivo programmatico:

2.1 Sistema di servizi integrati al settore agro-forestale

Area progettuale:

2.1.3 Sviluppo di servizi innovativi permanenti di supporto tecnico alle imprese

Struttura ERSAF proponente:

Struttura Vigilanza e qualità dell'agroalimentare e supporto alla filiera lattiera e casearia

Partner del progetto:

Dipartimento di Produzione Vegetale dell'Università degli Studi di Milano (DI.PRO.VE. Unimi)
Agricola 2000 S.c.p.a.

A cura di:

Prof. Tommaso Maggiore – DI.PRO.VE. Unimi – Responsabile Scientifico

Dott. Roberto Origgi – Agricola 2000 S.c.p.a.

Milano, giugno 2010

Il Dirigente
(dr. Mario Marchesi)

***Impatti a scala comprensoriale degli impianti di biogas
e problematiche agronomiche***

Relazione tecnica delle attività svolte e risultati raggiunti

1. Sommario

1. INTRODUZIONE.....	7
1.1 Premessa.....	7
1.2 Obiettivi e risultati attesi.....	7
1.3 Raccolta e analisi dei campioni di digestato dagli impianti di biogas.....	8
2. DETERMINAZIONE CURVE NIR.....	9
2.1 Valutazione Digestati.....	9
2.2 Disegno sperimentale.....	9
2.2.1 Valutazione dei sistemi di separazione e definizione del numero di campioni da trattare per la determinazione di calibrazioni significative.....	9
2.2.2 Realizzazione dell'apparato di separazione in scala di laboratorio.....	10
2.2.3 Individuazione degli impianti disponibili a fornire campioni di digestato.....	12
2.2.4 Campionamento di 15 impianti di diversa tipologia costruttiva e alimentazione.....	12
2.2.5 Separazione dei digestati raccolti.....	12
2.2.6 Determinazione con metodiche analitiche convenzionali della composizione delle tre frazioni, integrale, solida, liquida.....	16
2.2.7 Preparazione dei campioni da sottoporre ad analisi spettroscopiche e conservazione a – 20°C degli stessi e di un aliquota di ogni materiale.....	16
2.2.8 Scansione dei campioni con apparecchiatura NIRs.....	16
2.2.9 Analisi dei dati e determinazione della calibrazioni.....	17
2.3 Risultati.....	17
2.4 Caratterizzazione chimico fisica.....	18
2.5 Modello di calibrazione.....	32
2.5.1 Conclusioni modelli di calibrazione.....	35
2.6 Conclusioni.....	35
3. STUDIO DELLA MINERALIZZAZIONE DEI REFLUI ANAEROBICI (DIGESTATO DA FERMENTAZIONE ANAEROBICA)....	36
3.1 La sperimentazione.....	36
3.1.1 Preparazione dei materiali da impiegare per le prove di mineralizzazione.....	36
3.1.2 Mineralizzazione in suolo.....	40
3.2 Risultati.....	43
3.2.1 pH.....	44
3.2.2 Respirazione.....	48
3.2.3 Azoto disponibile per le piante (Plant Available Nitrogen – PAN).....	52
3.3 Conclusioni.....	56
4. STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN COMPENSORIO FUNZIONALE ALLA UTILIZZAZIONE AGRONOMICA DEGLI EFFLUENTI DI UN DIGESTORE ANAEROBICO.....	58
4.1 Il contesto agricolo e ambientale.....	58
4.2 Il valore economico dell'Azoto.....	58
4.3 Esigenze legate ai reflui immessi nel digestore.....	59
4.3.1 Reflui zootecnici utilizzati.....	59
4.3.2 Biomasse vegetali.....	60
4.4 Compensorio attuato (2009-2010).....	60
4.5 Elementi di valutazione del compensorio.....	61
4.5.1 Vantaggi.....	61
4.5.2 Criticità.....	62
4.6 Gestione del digestato nel compensorio delimitato nel 2009.....	63
4.6.1 Aziende agricole in convenzione.....	63
4.6.2 Azienda agricola proprietaria dell'impianto di biogas.....	65
4.7 Conclusioni.....	65
5. Bibliografia.....	66

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

Nel corso del **primo anno** sono state coinvolte le aziende agricole Eurosia di Rinaldi (Formigara, CR) e Muraro di Cogrossi (Maleo, LO) con prove colturali di 4 ibridi di mais da biomassa precoci in secondo raccolto dopo la raccolta di loiessa o trinciato di frumento (doppia coltura) in appezzamenti di circa 1 ha. Nelle stesse aziende sono state quindi condotte prove di digestione su tali ibridi. Le prove sulla doppia coltura non hanno dato risultati interessanti dal punto di vista economico sebbene la redditività annua dell'impianto – considerando un ammortamento in 15 anni – sia di circa il 3% del capitale investito.

Intanto sono stati raccolti i dati produttivi relativi alla digestione del mais con diverse caratteristiche morfo-fisiologiche e dei trinciati integrali di frumento (raccolti al 30% di s.s.); le caratteristiche qualitative; la lunghezza del ciclo colturale; la potenzialità di trasformazione in energia e i dati relativi ai reflui derivati dai fermentatori per biogas; i dati analitici comprensivi di macro-meso-microelementi e metalli pesanti sugli affluenti.

In fase di avvio e alla ricerca di una "razione" ottimale per massimizzare i rendimenti di biogas la mancanza di razioni costanti non ha consentito di ottenere dati analitici significativi. Pertanto si sono messe a punto metodologie analitiche sugli ingestati ai fini di determinare le produzioni di biogas relativi a 10 campioni noti.

Il **secondo anno** del progetto ha previsto azioni atte ad una ricerca che ha permesso di valutare l'utilizzo a livello comprensoriale dell'impianto di produzione elettrica di origine agricola con uno studio di fattibilità sul piano tecnico e socio-economico.

L'impianto di digestione anaerobica di Formigara (CR), che riceve la biomassa necessaria prodotta sulle aree a *set-aside* (circa 300 ha), è stato immaginato come impianto consortile per un territorio di circa 3.000-4.000 ha. I comuni interessati da questo progetto sono stati quelli limitrofi all'impianto e nello specifico: Formigara (CR), Crotta d'Adda (CR), Soresina (CR), S. Bassano (CR), Castelleone (CR).

Oltre ad esser ripresi in considerazioni i parametri già indagati nel corso del primo anno di lavori, nel corso del secondo anno si sono affiancati uno studio sull'influenza di tecniche alternative di fertirrigazione del mais presso l'Azienda Agro-Forestale "Carpaneta" di Bigarello (MN) che ha dimostrato avere costi fissi elevati e vincolandone l'applicabilità alle colture di mais di 1° semina; l'implementazione degli strati GIS per unità di paesaggio (interpolazione tra le carte dell'uso dei suoli, gli avvicendamenti colturali, la concimazione, la vulnerabilità, l'attitudine suoli all'utilizzo agronomico liquami, azoto prodotto/SAU).

Tutti questi dati hanno permesso la costruzione di un modello gestionale di utilizzo dell'impianto di produzione elettrica di origine agricola. A conclusione del lavoro svolto nel corso del II anno risulta più interessante realizzare colture a bassissimo costo di impianto da seminare precocemente (dopo la raccolta del mais di prima semina) e interrare prima della semina del mais.

1.2 Obiettivi e risultati attesi

Le attività di progetto sono iniziate il 1 ottobre 2008 e si sono concluse il 31 marzo 2010.

Il progetto si propone di valutare la produzione dei digestati, la loro gestione comprensoriale e il loro impatto sui terreni attraverso:

- gestione del digestato prodotto presso l'impianto di Formigara (CR), all'interno del comprensorio creato;
- verifica economica della convenienza della distribuzione e utilizzabilità del digestato;
- integrazione delle analisi sui digestati (tal quale, liquido e solido) comprensive di analisi al NIR (per sostanza secca, sostanza organica, azoto totale e ammoniacale, fosforo totale e organico) al fine di ottenere una curva di assorbimento nel tempo dell'azoto inorganico;

- studio della mineralizzazione di digestato tal quale, separato solido e separato liquido di diverse matrici.

I **risultati** attesi erano i seguenti:

- verificare convenienza e utilizzabilità della modalità di gestione comprensoriale del digestato;
- implementare i dati riferiti ai digestati (tal quale, liquido e solido);
- ottenere una curva di assorbimento nel tempo dell'azoto inorganico tramite analisi al NIR (per sostanza secca, sostanza organica, azoto totale e ammoniacale, fosforo totale e organico);
- ottenere dati sulla mineralizzazione di digestato tal quale, separato solido e separato liquido di diverse matrici;
- creare un comprensorio di gestione del digestato proveniente dall'azienda agricola Eurasia di Formigara (CR) che fungerà da modello per la gestione del digestato delle aziende che intenderanno attivare un impianto di biogas

Si intende valorizzare al massimo la replicabilità delle analisi ed esperienze del progetto attraverso:

- la creazione di un esempio di comprensorio per la gestione del digestato;
- la produzione di informazioni sulle caratteristiche chimiche dei digestati e degli ingestati che potranno essere utilizzati per l'implementazione delle attività a supporto del Piano d'azione nitrati regionale.

1.3 Raccolta e analisi dei campioni di digestato dagli impianti di biogas

È stata completata la raccolta dei campioni da 12 impianti e la loro separazione nelle fasi solida e liquida. Sono stati analizzati i seguenti parametri: azoto totale e ammoniacale, pH, sostanza secca, carbonio organico, conduttività, potenziale ossido-riduttivo e densità, per un totale di 3.500 determinazioni.

2. DETERMINAZIONE CURVE NIR

2.1 Valutazione Digestati

L'obiettivo del lavoro è la definizione di sistemi rapidi *on-line* di analisi dei digestati; ciò permetterebbe il corretto e puntuale utilizzo agronomico dei digestati, inoltre garantirebbe una precisa tracciabilità della gestione dei reflui anaerobici.

Il lavoro di caratterizzazione ha preso in considerazione le tre frazioni di digestato più comunemente reperibili nelle aziende ovvero:

- digestato integrale (effluente in uscita dall'impianto);
- digestato separato liquido (effluente liquido dopo separazione meccanica);
- digestato separato solido (fase solida dopo separazione meccanica).

2.2 Disegno sperimentale

Il lavoro si è articolato in diverse fasi.

2.2.1 Valutazione dei sistemi di separazione e definizione del numero di campioni da trattare per la determinazione di calibrazioni significative

Dopo una serie di sopralluoghi in impianti aziendali di produzione di biogas e una ricerca bibliografica, si è individuato come il sistema di separazione maggiormente diffuso sia il separatore a vite senza fine. Infatti nelle 15 aziende visitate, quattro aziende non effettuavano alcun tipo di separazione, un utilizza un sistema a staccio a due fasi, le rimanenti 10 attuano la separazione solido liquido con separatori a vite con fori del diametro di 2 mm.

Si individuato come numero di campioni da raccogliere sufficiente per la definizione di una calibrazione statisticamente significativa in 70 unità per ogni tipologia di digestato.

Quindi il lavoro ha preso in considerazione 70 campioni di digestato integrale e i relativi separati ottenuti dalla medesima operazione di separazione, vale a dire 70 campioni di separato solido e 70 campioni di separato liquido, per un totale di 210 campioni.

Figura 1 – Impianti di separazione: A) vite senza fine, B) separatore a due fasi



2.2.2 Realizzazione dell'apparato di separazione in scala di laboratorio

La loro funzione è essenzialmente quella di trattenere parte dei solidi sospesi nel refluo.

Si basano su un processo di separazione che avviene attraverso un filtro e sulla parziale asciugatura del separato solido attraverso la pressione

I separatori sono costituiti da un collettore che porta il refluo all'interno di un crivello, che provvede alla separazione tra la parte solida e liquida del refluo, da un sistema di pulizia che evita l'intasamento del crivello allontanando il materiale solido che si accumula sulla superficie filtrante.

In materiale solido incontra un sistema di spremitura che asciuga, ulteriormente il materiale solido.

L'apparato è completato da un sistema di raccolta e allontanamento del separato liquido e del separato solido.

2.2.2.1 Separatore a vite

Nel caso della separazione con vite senza fine la separazione avviene attraverso un crivello cilindrico che filtra al suo interno il refluo (Figura 2).

La superficie di filtrazione viene mantenuta pulita da una vite senza fine che ruotando raschia la superficie interna del crivello portando il materiale solido verso l'estremità di scarico opposta all'ingresso del refluo.

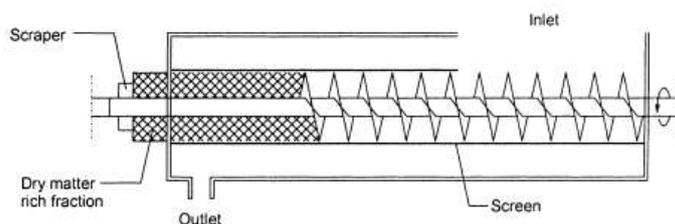
In fondo al cilindro il separato solido viene spinto contro una paratia mobile, mantenuta in sede da un contrappeso, qui avviene la spremitura finale del separato solido.

La pressione di spremitura viene determinata dalla massa del contrappeso e dal braccio della leva che lo collega alla paratia.

Tale pressione determina la formazione della "torta" di separato solido, a seguito della spinta della vite e del crescere della torta aumenta anche la pressione contro la paratia.

Quando la pressione del materiale solido supera la pressione della paratia la torta fuoriesce e cade nella platea di raccolta.

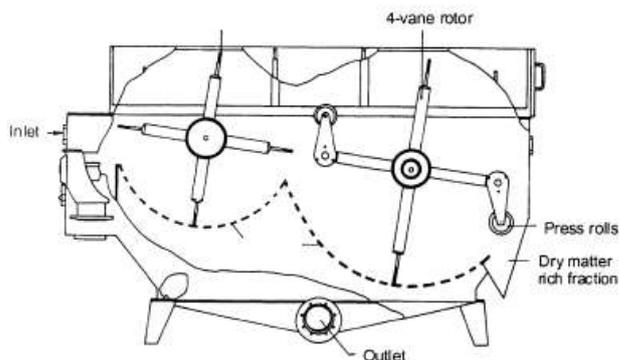
Figura 2 – Schema di un separatore a vite (Møller et al. 2000)



2.2.2.2 Separatore a due fasi

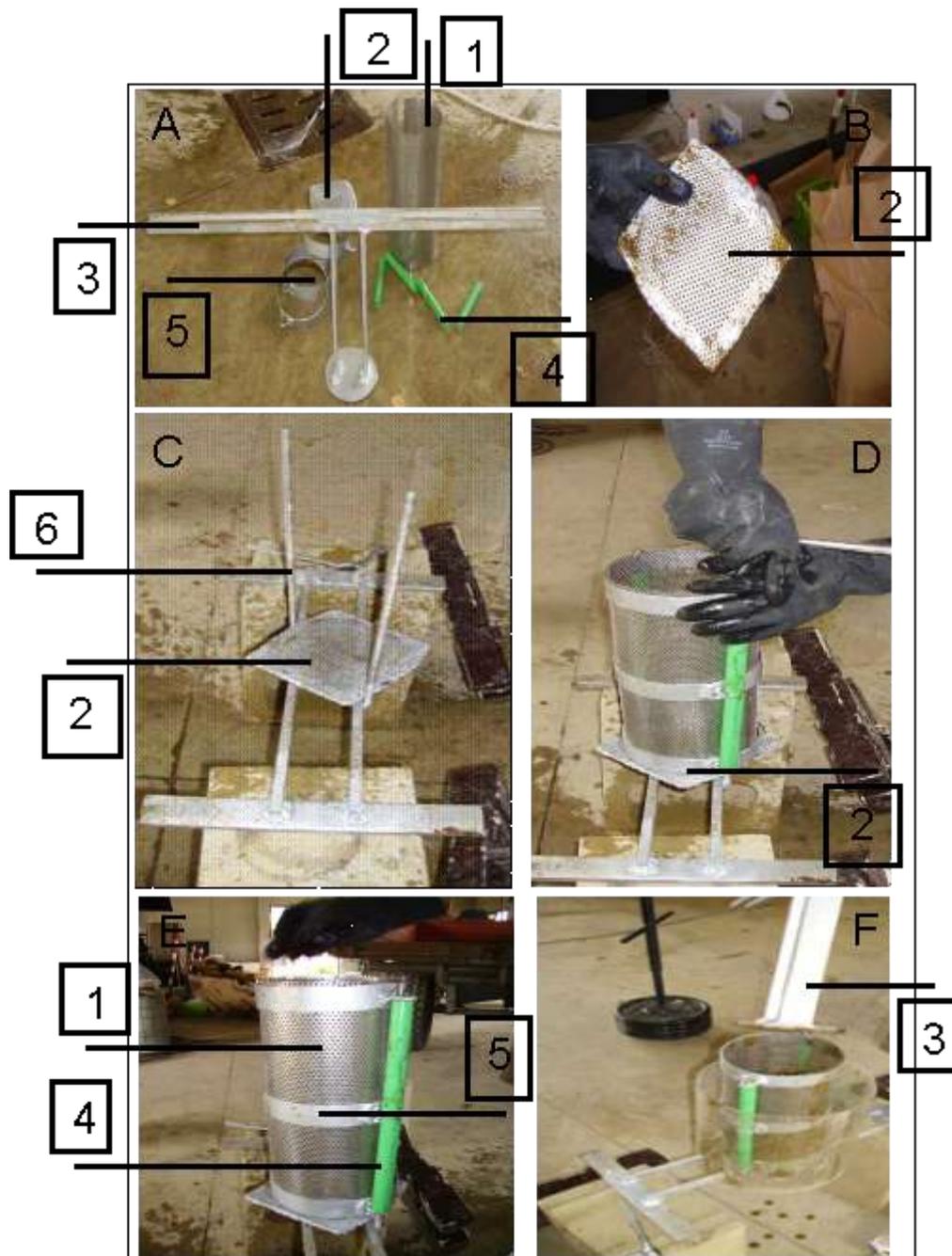
Il principio di funzionamento generale è identico al precedente, ovvero la separazione avviene su di un crivello, che è semicilindrico, la pulizia avviene grazie ad una lama che raschia il crivello e che spinge il materiale solido su un crivello semicilindrico posto a valle del primo, dove viene pressato da dei rulli montati su bracci rotanti, seguiti da un'altra lama che porta il separato solido verso lo scarico dell'apparato (Figura 3).

Figura 3 – Schema di un separatore a due fasi (Møller et al. 2000)



L'apparato di separazione da laboratorio quindi è stato realizzato in modo da separare il refluo attraverso un crivello che ricoglieva il solido sottoponendolo poi a pressatura con pressione controllata. In conclusione i sistemi di separazione sopradescritti, che rappresentano la soluzione impiantistica maggiormente diffusa negli impianti aziendali, hanno un funzionamento e un'efficienza di separazione del tutto analoghe.

Figura 4 – Separatore da laboratorio. Componenti: 1) Cilindro; 2) Fondo; 3) Pistone; 4) Distanziatori; 5) Cerchi di contenimento; 6) Incastellatura



Da tale premessa si è inteso realizzare un separatore da laboratorio in grado di riprodurre il processo di separazione costituito da una fase di filtrazione e da una fase di pressatura. Il separatore è costituito da una lastra forata flessibile di acciaio che viene inserita in una incastellatura smontabile che la costringe a formare un cilindro del diametro interno di 15 cm che viene mantenuto in posizione verticale.

Sul fondo del cilindro si trova una lamina della stessa lamiera che compone il cilindro.

L'interno del crivello così formato si inserisce un pistone formato da una piastra circolare del diametro di 15 cm

Il pistone viene gravato di 200 kg che corrispondono ad una pressione di $1,5 \text{ kg/cm}^2$ applicata alla torta di separato solido.

Il separatore è realizzato in acciaio ISO 304, inattaccabile ad acido e basi, e quindi completamente inerte nei confronti del digestato; il diametro dei fori della lamiera è di 2 mm.

2.2.3 Individuazione degli impianti disponibili a fornire campioni di digestato

Si è provveduto a contattare alcune aziende agricole dotate di impianti di fermentazione anaerobica, reperendo i nominativi tra quelli segnalateci dalla Regione Lombardia.

Vista la scarsa disponibilità da parte degli agricoltori a collaborare con estranei, si è proceduto a contattare aziende agricole su indicazione e dietro presentazione di agronomi professionisti consulenti delle stesse aziende.

Tali professioni sono stati individuati per conoscenza personale.

2.2.4 Campionamento di 15 impianti di diversa tipologia costruttiva e alimentazione

Sono stati, così individuati 15 impianti diversi da cui sono stati prodotti 58 campioni di digestato:

- 14 impianti lombardi ed 1 dell'Emilia Romagna;
- 12 impianti con potenza prodotta di 1 Mw/h, 1 da 250 kw/h e 2 da 500 kw/h;
- 3 impianti con regime termico di termofilia;
- 2 alimentati anche con FORSU e scarti di macellazione;
- 1 semplificato alimentato solo con letame e liquame bovino;
- 11 impianti bistadio, 1 tristadio, 3 monostadio;
- 13 impianti alimentati con colture energetiche, liquame suino o bovino

I rimanenti 12 campioni, sono stati prodotti da fermentatori sperimentali realizzati come descritto nel capitolo seguente ("Studio della mineralizzazione dei reflui anaerobici (digestato da fermentazione anaerobica)").

L'inserimento nella sperimentazione tali campioni ha permesso di aumentare la variabilità dei materiali oggetto di sperimentazione ampliando la popolazione dei dati e l'ambito di calibrazione delle curve NIRs. Al fine di produrre un campione significativo di digestato il campionamento è stato eseguito prelevando 25 L in taniche di plastica per uso alimentare di digestato integrale in uscita dall'impianto, nel momento stesso in cui l'impianto scaricava l'effluente.

Le taniche sono state sigillate; durante il trasporto presso il laboratorio, considerato che il materiale prelevato era ancora in fermentazione si è provveduto quando necessario a fare sfiatare il biogas accumulatosi nella tanica.

La separazione e le analisi sono state effettuate nello stesso giorno del campionamento.

2.2.5 Separazione dei digestati raccolti

I digestati raccolti sono stati separati secondo la procedura già indicata. Il separatore è posto sopra un recipiente che raccoglie il separato liquido.

Tabella 1 – Descrizione dell'origine dei campioni

Azienda di origine	Geometria		Regime termico	Potenza Prodotta (kw/h)	Alimentazione	campioni prelevati
	n. stadi	n. vasche				
Az. Bartesago	2	1+1	mesofilia	500	Suino, insilato mais	2
Az. Biancardi	2	1+1	mesofilia	1.000	Bovini carne, triticale, insilato mais, scarto lavorazione pomodoro, glicerina	2
Az. Crivelli	2	2+1	mesofilia	1.000	Suini, insilato mais, scarti, glicerina	6
Az. Federici	2	2+1	mesofilia	1.000	Bovino latte, stocchi mais trattati, triticale insilato	3
Az. Lameri	2	1+1, 1+1	mesofilia	500+500	Bovini latte, insilato mais	7
Az. Mestroni 1	2	1+1	mesofilia	500	Suino, trinciato mais	2 (+1)
Az. Mestroni 2	2	1+1	mesofilia	500	Suino, trinciato mais	2 (+1)
Az. Tadini			Mesofilia	100	Bovino latte	2
C.na Branduzza	3	1+1+1	termofilia	1.000	Suino, triticale insilato, residui macellazione, scarti ortofrutta, insilato mais	3
C.na Eurosia	2	2+1	mesofilia	1.000	Bovino carne, suini, insilato triticale, scarti	6
C.na Fenil del Pesce	1	1	mesofilia	250	Bovino latte, liquami, letame	3
C.na Le Gerre	2	2+1	mesofilia	1.000	Suini, insilato triticale	6
C.na Luna	1	1	termofilia	1.000	Suini, insilato mais	5
C.na Muraro	2	2+1	mesofilia	1.200	Bovino latte, insilato mais, glicerina	5
C.na Villanova di Sillaro	1	5	termofilia	1.000	Suini, FORSU, insilato mais	4
Mirea 1					Liquame suino	1
Mirea 2					Bovino, trinciato	2
Mirea 3					Suino, trinciato	2
Mirea 4	Batch semicontinuo		40°C		Liquame bovino	2
Mirea 5					Suino, FORSU	2
Mirea 6					Bovino, FORSU	2

2.2.5.1 Procedura di separazione

- 1) Si omogeneizza con cura il digestato integrale e se ne preleva un campione per le determinazioni analitiche.
- 2) Un'aliquota pesata, circa 2,5 – 3 kg, viene versata all'interno del cilindro forato.
- 3) Con un spatola si raschia, con un movimento circolare, la superficie interna del cilindro evitando che i fori si intasino e compromettano la filtrazione e si favorisce l'accumulo del materiale solido sulla piastra forata posta in fondo del cilindro e la fuoriuscita della frazione liquida che viene raccolta nel contenitore posto sotto il separatore (Figura 5 A).
- 4) Si inserisce il pistone all'interno del cilindro e lo si spinge fino a pressare il materiale sul fondo (Figura 5 B).
- 5) Si aggiunge gradatamente la zavorra agganciandola ai bracci del pistone (Figura 5 C)
- 6) Quando non si osserva più la percolazione di materiale liquido dal cilindro, si procede a rimuovere le zavorre.
- 7) Si pesa il separato liquido raccolto nel contenitore posto sotto il separatore.
- 8) Si rimuove il pistone, facendo attenzione a non perdere separato solido.
- 9) Si pesa il cilindro contenente il separato solido (Figura 5 G).
- 10) Vengono prelevati campioni, in doppio, dei materiali separati, uno dei due campioni viene immediatamente congelato a – 20°C, in un secondo tempo verrà impiegato per le scansioni NIRS, il rimanente campione verrà sigillato e conservato a 4°C fino al momento delle analisi, che verranno effettuate entro 2 ore.
- 11) L'apparato di separazione viene accuratamente lavato con acqua corrente rimontato.

I pesi raccolti riguardanti le masse di integrale, separato liquido e solido, vengono calcolati al netto delle tare dei contenitori e del cilindro.

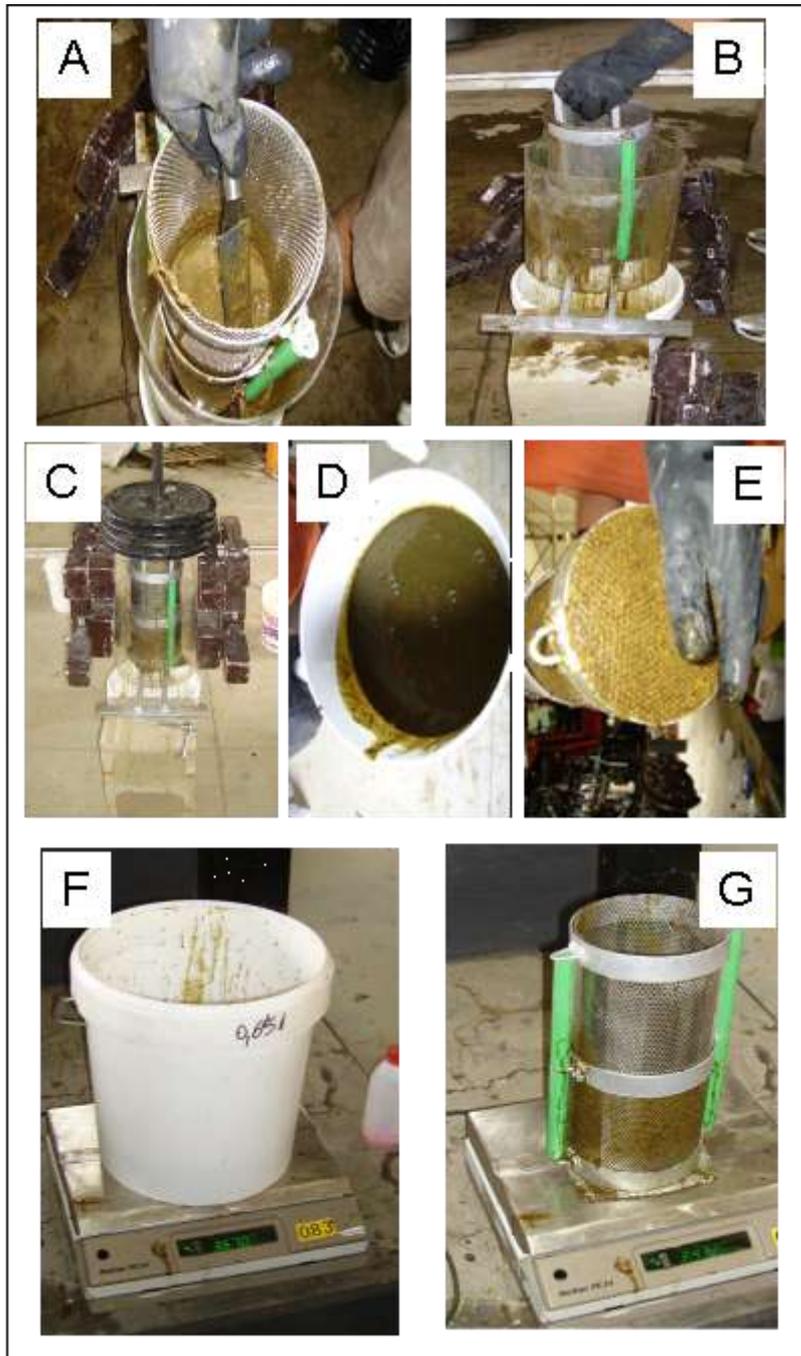
Il tempo necessario per ogni separazione è di circa 15 minuti, quindi le diverse frazioni di materiale vengono esposte all'aria per un tempo estremamente breve limitando al massimo eventuali perdite di ammoniaca.

Prima di cominciare la raccolta e il trattamento dei campioni per il progetto di ricerca, sono state effettuate alcune prove di separazione per testare l'efficacia del processo e la coerenza con i sistemi di separazione di scala reale.

Le valutazioni di efficacia del sistema sono state eseguite verificando il contenuto in sostanza secca, azoto totale e ammoniaca nelle frazioni di separato liquido e solido rispetto all'integrale.

I dati raccolti erano coerenti con la bibliografia e con i risultati delle analisi effettuate negli anni 2007 e 2008, su tre impianti aziendali, nel corso di questo stesso progetto, certificando la coerenza del processo di separazione di scala di laboratorio con quello di scala reale.

Figura 5 – Fasi della separazione. Operazioni: A) Raschiatura del cilindro; B) Inserimento del pistone; C) Pressatura; D) Separato liquido; E) Separato solido – torta; F) Pesatura separato liquido; G) Pesatura separato solido



2.2.6 Determinazione con metodiche analitiche convenzionali della composizione delle tre frazioni, integrale, solida, liquida

Le tre frazioni di digestato sono state sottoposte alla seguenti determinazioni:

Tabella 2 – Determinazioni analitiche

Determinazione analitica	Metodo
Sostanza secca	Stufa ventilata 80°
pH	potenziometrico
Ammoniaca	Distillazione, titolazione Kjeldahl
Azoto totale	Mineralizzazione, distillazione, titolazione
Densità	Densimetro
Conducibilità	Potenziometrico
Carbonio totale	Analisi elementare
Cationi (K, Ca, Mg, Na)	ICP massa
Anioni (S, P)	ICP massa

2.2.7 Preparazione dei campioni da sottoporre ad analisi spettroscopiche e conservazione a – 20°C degli stessi e di un aliquota di ogni materiale

Come già indicato precedentemente i campioni da sottoporre a spettroscopia NIRs sono stati conservati a – 20°C. Al momento delle determinazioni spettrometriche i campioni sono stati scongelati posti in sacchetti di polietilene e sigillati in assenza di bolle di aria.

Figura 6 – Campioni in sacchetti di polietilene per la scansione



2.2.8 Scansione dei campioni con apparecchiatura NIRs

Le scansioni spettroscopiche sono state effettuate presso il laboratorio dell'Istituto Sperimentale lattierocaseario di Lodi dove sotto la supervisione del Dott. Giovanni Cabassi, sono state determinati gli spettri.

La strumentazione usata è un apparecchio Buchi NIRFLEX N500 con sfera integratrice a riflettanza diffusa da 1.000 a 2.500 nm pari a 10.000 – 40.000 cm⁻¹ con risoluzione di 2 nm⁻¹, sono state effettuate 3 letture per campione utilizzando una piastra ruotante, con finestra al quarzo; i campioni sono stati preventivamente termostati a 25°C.

La scansione è stata effettuata direttamente attraverso il sacchetto sigillato evitando così inquinamenti del campione e del laboratorio.

Durante le sessioni di analisi NIRs sono stati raccolti anche gli spettri dei sacchetti vuoti, e riempiti di acqua distillata, per quantificare le interferenze di tali materiali sugli spettri dei campioni.

2.2.9 *Analisi dei dati e determinazione della calibrazioni*

I dati raccolti dalle determinazioni e analitiche e in sede di separazione dei digestati, sono state elaborate per la definizione della composizione delle tre forme di digestati, e della ripartizione degli dei singoli costituenti nelle varie frazioni di separato rispetto all'integrale.

2.3 Risultati

Il bilancio di separazione della massa di digestato è riportato nella Tabella 3.

Si può notare come il recupero del materiale sia pressoché totale dopo la separazione, infatti la somma delle aliquote dei singoli separati, è prossima a cento per tutti i campioni, fatta eccezione per i campioni 1 e 15 che comunque sono rispettivamente di 85,67% e 88,09%. Ciò evidenzia come il sistema di separazione adottato in laboratorio, abbia una buon efficienza.

La percentuale media della frazione solida del digestato degli impianti, escludendo i valori in percentuale del separato solido, presentano un notevole variabilità tra i diversi impianti e sono compresi fra lo 0,62% (campione 53 – C.na Villanova del Sillaro) e il 17,34 (campione 6 – C.na Eurasia), mentre risultano essere poco variabili per lo stesso impianto.

L'alimentazione del fermentatore incide sulle proporzioni delle frazioni separate.

Il digestato prodotto dai fermentatori alimentati con biomassa vegetale, in particolare trinciato integrale di mais o letami, è più ricco in materiale fibroso non fermentato, questo tipo di digestato sottoposto a separazione ovviamente produce una quantità maggiore di separato solido a parità di digestato integrale trattato. Infatti nei dati riportati nella Tabella 3 si può osservare come gli impianti alimentati con FORSU e scarti vari producano percentuali di separato solido nettamente inferiori rispetto agli altri impianti.

Naturalmente le considerazioni sopraesposte valgono in senso opposto per la frazione liquida del separato liquido, considerato che questa è il complemento a 100 della frazione solida.

Tabella 3 – Rese di separazione

Cod.	Azienda di origine	Liquido su integrale t.q. (%)	Solido su integrale t.q. (%)	Somma (%)
36	Az. Bartesago	94,56	4,99	99,55
46	Az. Bartesago	94,27	5,60	99,86
51	Az. Biancardi	88,53	11,01	99,54
61	Az. Biancardi	87,48	11,32	98,80
3	Az. Crivelli	84,67	15,00	99,67
7	Az. Crivelli	82,25	16,17	98,42
11	Az. Crivelli	81,41	17,32	98,73
15	Az. Crivelli	82,17	5,92	88,09
25	Az. Crivelli	91,82	7,15	98,97
39	Az. Crivelli	87,49	12,40	99,89
22	Az. Federici	84,31	14,26	98,57
32	Az. Federici	86,62	11,57	98,18
44	Az. Federici	89,46	10,54	100,00
1	Az. Lameri	76,32	9,36	85,67
5	Az. Lameri	87,15	11,51	98,66
9	Az. Lameri	86,36	12,59	98,95
13	Az. Lameri	84,68	13,46	98,14
23	Az. Lameri	88,10	10,23	98,33
37	Az. Lameri	89,90	9,53	99,43
48	Az. Lameri	87,22	9,95	97,17
20	Az. Mestroni 1	89,10	9,46	98,56
30	Az. Maestroni 1	89,99	7,57	97,56
21	Az. Mestroni 2	89,56	9,57	99,12
31	Az. Maestroni 2	90,38	8,85	99,23
43	Az. Maestroni mix 1+2	88,33	10,73	99,06
52	Az. Tadini	95,05	4,55	99,59
64	Az. Tadini	94,61	4,75	99,37
35	C.na Branduzza	91,26	1,47	92,72
49	C.na Branduzza	96,87	2,17	99,05
62	C.na Branduzza	96,55	2,61	99,16
2	C.na Eurosia	85,80	13,06	98,86
6	C.na Eurosia	81,22	17,34	98,56
10	C.na Eurosia	82,90	13,81	96,72

Cod.	Azienda di origine	Liquido su integrale t.q. (%)	Solido su integrale t.q. (%)	Somma (%)
14	C.na Eurosia	82,42	14,88	97,30
24	C.na Eurosia	92,40	6,17	98,56
38	C.na Eurosia	87,42	12,26	99,68
19	C.na Fenil del Pesce	83,53	15,27	98,80
29	C.na Fenil del Pesce	88,00	11,37	99,37
42	C.na Fenil del Pesce	86,16	10,83	97,00
4	C.na Le Gerre	87,13	12,01	99,14
8	C.na Le Gerre	85,41	12,90	98,31
12	C.na Le Gerre	85,54	12,83	98,37
16	C.na Le Gerre	84,97	12,85	97,82
26	C.na Le Gerre	84,54	13,28	97,82
40	C.na Le Gerre	89,67	9,81	99,47
17	C.na Luna	94,39	5,12	99,51
27	C.na Luna	93,91	5,35	99,26
41	C.na Luna	90,02	4,84	94,86
65	C.na Luna	84,91	14,61	99,52
50	C.na Luna	84,19	15,35	99,54
34	C.na Muraro	91,91	6,26	98,18
47	C.na Muraro	90,76	8,67	99,43
45	C.na Muraro	90,33	9,37	99,70
54	C.na Muraro	91,09	7,52	98,61
63	C.na Muraro	90,53	9,02	99,55
18	C.na Villanova del Sillaro	95,04	2,64	97,68
28	C.na Villanova del Sillaro	88,00	11,37	99,37
33	C.na Villanova del Sillaro	92,67	1,27	93,94
53	C.na Villanova del Sillaro	98,94	0,62	99,56
55	Mirea 1	98,85	0,85	99,70
56	Mirea 2	80,60	18,74	99,33
66	Mirea 2	82,92	16,97	99,89
57	Mirea 3	92,40	7,34	99,75
67	Mirea 3	92,28	7,28	99,56
58	Mirea 4	94,85	4,68	99,53
68	Mirea 4	92,01	7,47	99,48
59	Mirea 5	97,42	2,15	99,58
69	Mirea 5	96,52	3,37	99,89
60	Mirea 6	94,73	4,80	99,52
70	Mirea 6	93,41	6,50	99,91

2.4 Caratterizzazione chimico fisica

La caratterizzazione chimico-fisica dei campioni, Tabella 4 e Tabella 5, indicano come i digestati integrali e le frazioni liquide ottenute dagli stessi per separazione siano molto simili tra loro per quanto riguarda la loro composizione sul tal quale.

L'unico parametro che differenzia in maniera significativa i due tipi di materiali è la sostanza secca che nel caso dei digestati integrali è mediamente del 5-6% mentre per i separati liquidi è del 3,95%.

Il separato solido presenta un valore medio di pH di 8,93 e valori massimo e minimo rispettivamente di 9,53 e di 8,53; considerando, inoltre, l'abbondante dotazione media di azoto ammoniacale e la natura porosa del materiale, è evidente come la frazione solida del digestato può essere oggetto di forte volatilizzazione dell'ammoniaca.

Il contenuto in azoto ammoniacale espresso sul tal quale del digestato integrale e della frazione liquida e di quella solida del separato è simile: valori medi intorno allo 0,22%. Quello dell'azoto totale sul tal quale è 0,35% nel digestato integrale, dello 0,33% nel liquido e molto più alto nel separato solido: 0,52%.

Il rapporto fra l'azoto ammoniacale e l'azoto totale mostra come il digestato integrale e la frazione liquida dello stesso abbiano composizioni simili tra loro, con valori medi del 62% per l'integrale e del 65% per il liquido, e valori massimi rispettivamente del 98% e del 90%. I valori minimi del rapporto $N-NH_4/N_{tot}$ sono del 35% per l'integrale e del 47% per il liquido. Il separato solido invece presenta valori medi del 41,7% ,con valore minimo del 23% e massimo del 67%.

I rapporti $N-NH_4/N_{tot}$ sono, ovviamente, conseguenza della solubilità dell'ammoniaca nell'acqua, infatti nella frazione solida il contenuto in ammoniaca rispetto all'azoto totale, come visto prima, è molto inferiore rispetto a quello riscontrato nella frazione liquida e nel digestato integrale.

È necessario comunque sottolineare che nel caso del N-NH₄/N_{tot} la forchetta di valori è molto ampia con valori differenziali che superano i 50 punti percentuali.

Anche le concentrazioni del fosforo, potassio, calcio, magnesio e sodio (Tabella 5), presentano un andamento simile tra loro nelle diverse frazioni di digestato e di digestato integrale sul tal quale.

Tabella 4 – Dati riassuntivi dei valori medi, minimi, massimi e deviazione standard della sostanza secca, pH, azoto totale, ammoniacale, rapporto carbonio azoto (C/N) e rapporto azoto ammoniacale azoto totale (NH₄/N_{tot})

		ss (%)	pH	N-NH ₄ t.q. (%)	N _{tot} t.q. (%)	NH ₄ /N _{tot}	C t.q. (%)	N-NH ₄ ss (%)	N _{tot} ss (%)	C ss (%)	C/N
Integrale	Media	5,26	7,88	0,22	0,35	62,05	1,86	4,44	6,92	35,39	5,46
	DS	1,16	0,20	0,07	0,07	12,66	0,46	1,82	1,85	3,62	1,57
	Max	7,21	8,21	0,39	0,53	98,73	2,67	10,28	12,29	47,88	10,39
	min	2,38	7,42	0,10	0,18	35,34	0,82	1,60	3,76	26,78	2,47
Separato liquido	Media	3,95	7,96	0,22	0,33	65,19	1,28	5,70	8,61	32,62	4,08
	DS	0,86	0,19	0,06	0,08	8,33	0,29	2,17	2,56	3,00	1,24
	Max	5,84	8,30	0,41	0,60	90,59	1,80	12,95	16,59	37,62	9,04
	min	1,89	7,56	0,09	0,17	47,81	0,56	1,97	3,94	22,81	1,88
Separato solido	Media	19,04	8,89	0,22	0,52	41,69	7,88	1,84	2,12	41,43	15,49
	DS	3,06	0,25	0,06	0,10	8,33	1,40	1,00	0,90	3,63	3,28
	Max	27,48	9,53	0,38	0,81	67,59	12,46	4,67	4,89	54,11	25,10
	min	13,40	8,12	0,10	0,33	22,97	4,94	0,49	0,69	29,70	7,89

Tabella 5 – Dati riassuntivi dei valori medi, minimi, massimi e deviazione standard di fosforo, potassio, magnesio, calcio e sodio

		P		K		Mg		Ca		Na	
		t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
Integrale	Media	0,24	1,32	0,37	1,94	0,10	0,54	0,72	3,74	0,44	2,33
	DS	0,20	1,17	0,24	1,37	0,05	0,32	0,31	1,80	0,32	1,84
	Max	1,17	6,57	1,13	6,09	0,36	2,33	1,93	12,47	2,56	14,18
	min	0,04	0,19	0,06	0,38	0,03	0,16	0,13	0,84	0,18	0,64
Separato liquido	Media	0,22	0,90	0,46	1,82	0,10	0,40	0,89	3,52	0,41	1,65
	DS	0,19	0,86	0,27	1,18	0,05	0,22	0,77	3,10	0,20	0,95
	Max	1,47	6,52	1,72	7,62	0,35	1,57	6,76	25,81	1,44	6,39
	min	0,03	0,07	0,10	0,29	0,04	0,12	0,21	0,47	0,16	0,57
Separato solido	Media	0,22	4,18	0,11	2,02	0,08	1,48	0,23	4,33	0,34	6,50
	DS	0,14	2,71	0,06	1,14	0,04	0,77	0,13	2,57	0,21	4,29
	Max	0,77	15,30	0,25	4,71	0,25	4,50	0,92	19,78	1,53	28,39
	min	0,01	0,18	0,01	0,10	0,001	0,03	0,01	0,11	0,02	0,39

Tabella 6 – Analisi chimica-fisica dei campioni di digestato integrarle: pH, sostanza secca, carbonio, azoto, rapporto carbonio-azoto e rapporto azoto ammoniacale-azoto totale

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ ss	N _{tot} ss	C ss	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V. %	%					
1	6,24	0,21	7,93	0,200000	1,049324	0,360399	0,497504	56,43	2,34	3,258769	5,774991	37,52	6,50
2	7,21	0,07	8,00	0,170000	8,645924	0,351522	0,612195	47,13	2,67	2,298289	4,876118	37,11	7,61
3	6,10	0,29	8,17	0,270000	0,433091	0,419584	3,151931	63,50	2,30	4,364582	6,872821	37,64	5,48
4	4,71	0,04	7,89	0,230000	5,627647	0,350000	28,28429	62,95	1,55	4,678221	7,431705	32,99	4,44
5	5,47	0,00	7,89	0,190000	0,817568	0,381826	6,361013	49,17	2,05	3,432554	6,980685	37,46	5,37
6	6,10	0,88	7,69	0,190000	1,860898	0,361577	1,790213	53,50	2,19	3,173684	5,931785	36,00	6,07
7	6,17	0,09	7,94	0,271282	1,069367	0,463240	5,429799	58,56	2,28	4,396595	7,507607	36,91	4,92
8	6,64	0,04	8,01	0,233800	14,39607	0,407194	1,206059	57,42	2,48	3,518897	6,128628	37,32	6,09
9	6,82	1,76	7,71	0,219528	5,135564	0,344319	11,08362	63,76	2,46	3,219481	5,049603	36,05	7,14
10	6,44	0,03	7,68	0,207943	3,665908	0,370204	4,230100	56,17	2,18	3,228662	5,74802	33,83	5,89
11	6,44	0,43	7,79	0,289066	1,520760	0,498860	10,27683	57,95	2,30	4,485855	7,741538	35,63	4,60
12	6,24	0,10	7,89	0,223222	8,376862	0,406068	2,732301	54,97	2,22	3,579301	6,511172	35,57	5,46
13	5,61	0,11	7,91	0,192028	9,798571	0,345965	0,951830	55,51	2,11	3,421862	6,164937	37,63	6,10
14	5,25	0,62	7,95	0,166667	5,656789	0,339231	5,237729	49,13	1,93	3,177046	6,466511	36,80	5,69
15	4,73	0,02	8,02	0,252683	3,822180	0,409446	9,542406	61,71	1,62	5,342199	8,656463	34,33	3,97
16	6,49	0,06	8,05	0,231903	9,476376	0,411285	9,561253	56,38	2,42	3,570957	6,33317	37,19	5,87
17	3,31	0,01	7,85	0,122281	5,072742	0,345965	0,951830	35,34	1,13	3,695863	10,45658	34,01	3,25
18	4,28	0,04	8,08	0,376667	1,251503	0,428718	0,676669	87,86	1,50	8,807543	10,02465	35,15	3,51
19	6,87	0,57	7,81	0,219442	2,937450	0,323226	4,991245	67,89	2,53	3,193166	4,703363	36,78	7,82
20	5,30	0,16	8,12	0,325556	4,681529	0,345965	0,951830	94,10	1,74	6,138026	6,522816	32,72	5,02
21	6,26	0,57	8,04	0,231778	0,949184	0,365909	3,689169	63,34	2,00	3,703883	5,847344	31,92	5,46
22	6,84	1,39	7,65	0,261807	13,18872	0,376222	3,592028	69,59	2,59	3,829676	5,503331	37,87	6,88
23	6,47	1,32	7,71	0,237103	17,23597	0,333333	5,656806	71,13	2,32	3,662698	5,149246	35,90	6,97
24	5,54	0,25	7,47	0,220698	0,447217	0,354579	13,40237	62,24	2,04	3,984403	6,401447	36,83	5,75
25	4,04	0,26	7,85	0,294184	3,535542	0,423415	9,123909	69,48	1,23	7,273617	10,46881	30,52	2,91
26	7,17	1,11	8,17	0,260909	10,34805	0,398763	9,788521	65,43	2,51	3,641349	5,565295	34,97	6,28
27	2,38	0,48	7,61	0,160926	2,616109	0,176273	49,52318	91,29	0,82	6,768288	7,413765	34,32	4,63
28	4,33	0,30	7,89	0,390634	0,494581	0,532167	5,624926	73,40	1,68	9,018772	12,28641	38,72	3,15
29	5,82	0,21	7,93	0,235965	0,904371	0,374500	0,478772	63,01	2,12	3,258769	5,774991	36,50	5,67
30	6,20	0,07	8,09	0,207672	6,897897	0,385326	0,558488	53,90	2,04	2,298289	4,876118	32,93	5,30
31	6,15	0,29	8,09	0,226486	0,509524	0,388594	3,403295	58,28	1,98	4,364582	6,872821	32,17	5,09
32	5,64	0,04	7,66	0,223404	5,550035	0,400324	2,472872	55,81	2,07	4,678221	7,431705	36,67	5,17
33	4,64	0,00	7,74	0,378190	0,405881	0,523392	4,640499	72,26	1,69	3,432554	6,980685	36,41	3,23
34	4,95	0,88	8,08	0,152754	2,356730	0,266517	2,428738	57,31	2,37	3,173684	5,931785	47,88	8,89
35	4,16	0,09	8,16	0,264444	1,097019	0,423415	5,940508	62,46	1,49	4,396595	7,507607	35,92	3,53
36	5,21	0,04	8,12	0,305128	11,03078	0,400125	1,227366	76,26	1,40	3,518897	6,128628	26,78	3,49
37	6,04	1,76	7,73	0,193610	5,823046	0,327833	11,64099	59,06	2,40	3,219481	5,049603	39,74	7,33

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ ss	N _{tot} ss	C ss	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V %	%					
38	5,62	0,03	7,57	0,206145	3,697883	0,339302	4,615357	60,76	1,74	3,228662	5,74802	30,86	5,11
39	3,14	0,43	7,95	0,262988	1,671559	0,389529	13,16128	67,51	1,24	4,485855	7,741538	39,37	3,17
40	5,93	0,10	7,95	0,227907	8,204662	0,404961	2,739770	56,28	1,76	3,579301	6,511172	29,70	4,35
41	3,41	0,11	7,75	0,146667	12,82906	0,231681	1,421351	63,31	1,32	3,421862	6,164937	38,64	5,68
42	6,25	0,62	8,04	0,184496	5,110138	0,350036	5,076049	52,71	2,28	3,177046	6,466511	36,50	6,51
43	6,14	0,02	8,09	0,185606	5,203496	0,354967	11,00694	52,29	2,17	5,342199	8,656463	35,42	6,12
44	5,81	0,06	7,88	0,211707	10,38038	0,368936	10,65876	57,38	1,82	3,570957	6,33317	31,32	4,93
45	5,27	0,01	8,05	0,152133	4,077353	0,297679	1,106225	51,11	1,85	3,695863	10,45658	35,06	6,21
46	5,21	0,04	8,18	0,270303	1,743969	0,353333	0,821039	76,50	1,96	8,807543	10,02465	37,57	5,54
47	5,26	0,57	7,79	0,166047	3,882033	0,264421	6,101255	62,80	1,47	3,193166	4,703363	28,03	5,57
48	5,03	0,16	7,76	0,106735	14,27929	0,247291	1,331630	43,16	1,73	6,138026	6,522816	34,47	7,01
49	5,38	0,57	8,20	0,303545	0,724769	0,468000	2,884402	64,86	2,01	3,703883	5,847344	37,37	4,30
50	5,86	1,39	7,66	0,161870	21,33132	0,293178	4,609486	55,21	1,75	3,829676	5,503331	29,88	5,97
51	4,76	1,32	8,08	0,188565	21,67263	0,351782	5,360138	53,60	1,90	3,662698	5,149246	40,00	5,41
52	4,03	0,25	7,73	0,136410	0,723554	0,220632	2,153903	61,83	1,78	3,984403	6,401447	44,22	8,07
53	3,18	0,26	8,21	0,315449	3,297205	0,463077	8,342457	68,12	1,14	7,273617	10,46881	35,91	2,47
54	5,09	1,11	8,01	0,141628	19,06332	0,269671	1,447430	52,52	1,83	3,641349	5,565295	36,02	6,80
55	2,46	0,48	7,89	0,245641	1,713883	0,292753	2,981899	83,91	0,85	6,768288	7,413765	34,61	2,91
56	6,33	0,30	7,42	0,107545	1,796457	0,248841	1,202937	43,22	2,24	9,018772	12,28641	35,43	9,01
57	3,97	0,21	7,59	0,216140	0,987323	0,289015	0,620383	74,79	1,18	5,438200	7,271766	29,59	4,07
58	3,52	0,07	7,50	0,133825	10,70428	0,221667	0,970826	60,37	1,24	3,800710	6,295485	35,28	5,60
59	3,71	0,29	8,00	0,293833	0,392740	0,385583	3,429871	76,20	1,13	7,929311	10,40525	30,46	2,93
60	5,00	0,04	7,72	0,228063	5,436656	0,369703	26,77690	61,69	1,51	4,564239	7,39887	30,32	4,10
61	6,31	0,00	8,03	0,177512	0,86473	0,333641	7,279681	53,20	1,90	2,814406	5,289796	30,12	5,69
62	5,97	0,88	8,10	0,284000	1,267606	0,468979	1,380232	60,56	2,58	4,756756	7,854992	43,14	5,49
63	5,62	0,09	7,78	0,136957	2,118183	0,346132	7,266881	39,57	1,66	2,436751	6,158439	29,56	4,80
64	3,94	0,04	7,68	0,133367	2,523713	0,248365	1,977332	53,70	1,42	3,385348	6,304436	36,07	5,72
65	5,61	1,76	7,57	0,167301	6,738752	0,271466	14,05811	61,63	2,05	2,984232	4,842282	36,51	7,54
66	6,05	0,03	7,59	0,096590	7,892121	0,227720	6,876866	42,42	2,37	1,596753	3,764477	39,11	10,39
67	3,87	0,43	7,76	0,269191	1,633041	0,247579	20,70733	98,73	1,36	6,94803	6,390202	35,19	5,51
68	3,78	0,10	7,80	0,126000	14,84048	0,220256	5,037320	57,21	1,38	3,336187	5,831869	36,41	6,24
69	3,49	0,11	8,07	0,359280	5,237141	0,368461	0,893717	97,51	1,17	10,28053	10,54324	33,35	3,16
70	4,89	0,62	7,64	0,218395	4,316949	0,334348	5,314224	65,32	1,82	4,468867	6,841543	37,33	5,46

Tabella 7 – Analisi chimica-fisica dei campioni di separato liquido: pH, sostanza secca, carbonio, azoto, rapporto carbonio-azoto e rapporto azoto ammoniacale-azoto totale

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ s.s.	N _{tot} s.s.	C s.s.	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V. %	%					
1	4,22	0,0	8,04	0,207524	4,736802	0,350879	5,323773	59,14	1,46	3,015856	6,308399	34,57	4,16
2	5,16	0,0	7,94	0,155537	6,680083	0,325343	5,050055	47,81	1,78	6,336998	9,307529	34,50	5,47
3	4,12	0,2	8,25	0,261085	1,938066	0,383471	1,520324	68,08	1,38	3,957471	6,884873	33,39	3,59
4	5,18	0,5	8,16	0,205152	1,184488	0,356905	0,952634	57,48	1,75	5,906219	7,535779	33,84	4,92
5	4,03	0,1	7,94	0,238044	9,103359	0,303722	5,426015	78,38	1,41	4,353638	7,259460	35,10	4,66
6	4,90	0,1	7,79	0,213296	1,11582	0,355659	2,530514	59,97	1,67	7,378811	9,781215	34,14	4,70
7	3,79	0,0	8,11	0,280000	2,817857	0,371163	6,641287	75,44	1,24	4,857108	8,162327	32,66	3,34
8	4,69	0,0	8,08	0,227576	9,038739	0,382439	2,651403	59,51	1,63	5,632296	8,529910	34,79	4,26
9	3,80	0,0	7,89	0,213772	12,18588	0,323750	1,272587	66,03	1,29	5,181149	8,511296	33,93	3,98
10	4,25	0,2	7,80	0,220182	2,452517	0,361702	0,666294	60,87	1,32	8,500683	10,37161	31,13	3,66
11	3,59	0,0	7,93	0,305101	2,785963	0,372251	1,952983	81,96	1,07	5,140409	9,484895	29,93	2,89
12	4,52	0,1	8,00	0,232465	5,149162	0,428936	19,64162	54,20	1,48	4,923861	7,958176	32,80	3,46
13	3,79	0,0	8,04	0,186759	3,143088	0,301848	7,255307	61,87	1,31	4,35113	7,175056	34,43	4,33
14	4,54	0,0	7,97	0,197685	10,98718	0,325984	3,751718	60,64	1,47	6,903128	10,88504	32,27	4,50
15	3,58	0,1	8,13	0,246977	3,996324	0,389440	0,457067	63,42	1,17	4,529899	8,231023	32,65	3,00
16	4,85	0,0	8,08	0,219626	11,43763	0,399070	14,50372	55,03	1,62	4,691272	7,281346	33,44	4,06
17	2,84	0,4	7,95	0,133250	3,707317	0,206818	2,175826	64,43	0,87	11,74730	16,59063	30,77	4,23
18	3,12	0,0	8,15	0,365987	3,718711	0,516880	2,455115	70,81	1,14	4,651587	7,179703	36,74	2,21
19	4,62	0,3	7,99	0,214712	4,177689	0,331408	3,071742	64,79	1,60	3,663990	5,925240	34,68	4,83
20	5,84	1,4	8,16	0,213889	2,571427	0,345891	0,318019	61,84	1,80	4,092403	6,978630	30,83	5,20
21	5,22	0,5	8,09	0,213768	8,532615	0,364531	1,001287	58,64	1,57	4,444291	6,852225	30,06	4,31
22	4,92	0,6	8,20	0,218834	0,191926	0,337398	1,704219	64,86	1,76	4,799764	7,497865	35,70	5,21
23	4,34	0,7	7,82	0,208205	0,000000	0,325244	10,76423	64,02	1,29	5,499564	8,629911	29,78	3,97
24	3,86	0,0	7,56	0,212442	1,623973	0,333364	0,539950	63,73	1,43	9,643228	13,09783	37,01	4,29
25	2,87	0,1	7,94	0,277233	8,552373	0,376549	7,343002	73,62	0,91	4,915130	8,962879	31,68	2,42
26	4,50	0,0	8,26	0,221183	2,676517	0,403333	8,181825	54,84	1,45	7,555127	11,00853	32,24	3,60
27	2,33	0,2	7,71	0,176195	6,577939	0,256733	1,530773	68,63	0,71	9,021097	12,42675	30,43	2,76
28	4,53	0,3	7,91	0,408947	3,822011	0,563333	0,836095	72,59	1,59	3,015856	6,308399	35,17	2,83
29	2,25	0,0	7,96	0,212000	8,004717	0,341463	2,829003	62,09	0,80	9,408959	15,15479	35,33	2,33
30	4,48	0,1	8,05	0,230620	1,665077	0,361163	10,38866	63,85	1,21	5,149843	8,064923	27,08	3,36
31	5,30	0,9	8,30	0,230045	0,586842	0,367907	3,753666	62,53	1,58	4,336526	6,935317	29,81	4,30
32	4,26	0,1	8,27	0,232277	6,62571	0,378807	14,16289	61,32	1,24	5,447456	8,883949	29,17	3,28
33	4,21	0,2	7,80	0,385667	2,810715	0,602244	11,44885	64,04	1,49	9,168098	14,31660	35,41	2,47
34	4,28	0,4	8,12	0,160500	0,442368	0,280094	3,673767	57,30	1,34	3,752910	6,549341	31,33	4,78
35	4,44	0,5	8,15	0,252778	8,268125	0,399000	7,443609	63,35	1,27	5,693169	8,986448	28,55	3,18
36	4,29	0,1	8,20	0,290000	4,875862	0,410066	2,187453	70,72	1,31	6,757265	9,554903	30,62	3,21

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ s.s.	N _{tot} s.s.	C s.s.	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V %	%					
37	3,88	0,1	7,88	0,185663	2,542241	0,297073	8,129315	62,50	0,89	4,783027	7,653171	22,81	2,98
38	4,23	0,0	7,70	0,207519	0,583079	0,327805	0,000000	63,31	1,34	4,905865	7,749477	31,57	4,07
39	3,00	0,0	8,00	0,278064	8,106048	0,343333	1,371846	80,99	0,94	9,271895	11,44827	31,23	2,73
40	4,34	0,0	8,10	0,229209	3,215406	0,358537	9,427200	63,93	1,46	5,276823	8,254176	33,61	4,07
41	2,67	0,0	7,80	0,148066	1,627653	0,239593	3,693764	61,80	0,87	5,552717	8,985175	32,59	3,63
42	4,75	0,1	8,04	0,182417	1,529463	0,311159	1,745089	58,63	1,64	3,836449	6,544026	34,42	5,26
43	4,80	0,0	8,13	0,179070	2,568828	0,309710	10,78751	57,82	1,42	3,726849	6,445772	29,59	4,59
44	4,15	0,0	7,70	0,213546	1,217536	0,339450	0,839593	62,91	1,46	5,147622	8,182587	35,28	4,31
45	4,35	0,1	8,14	0,160488	3,009571	0,263333	8,950644	60,94	1,33	3,687993	6,051373	30,46	5,03
46	4,47	0,0	8,19	0,265547	3,773343	0,404378	1,881903	65,67	1,35	5,937255	9,041335	30,22	3,34
47	3,89	0,1	7,84	0,161395	1,220608	0,242648	0,482180	66,51	1,36	4,151730	6,241876	35,06	5,62
48	3,96	0,0	7,84	0,107967	1,704224	0,200853	5,292428	53,75	1,49	2,729096	5,076958	37,57	7,40
49	5,25	0,0	8,21	0,286682	0,156968	0,436667	1,078625	65,65	1,47	5,465238	8,324515	28,03	3,37
50	3,10	0,0	7,74	0,152727	5,892868	0,273333	3,450004	55,88	1,14	4,924106	8,812587	36,82	4,18
51	3,92	0,0	8,14	0,187795	2,342980	0,280000	0,000000	67,07	0,89	4,788520	7,139625	22,81	3,19
52	3,34	0,1	7,83	0,136410	0,000000	0,202222	2,175827	67,46	1,05	4,084450	6,055018	31,57	5,21
53	3,39	0,2	8,18	0,311810	1,058337	0,469819	0,246904	66,37	1,06	9,198942	13,86049	31,23	2,25
54	4,17	0,2	8,08	0,143182	3,142853	0,252536	1,124592	56,70	1,40	3,432358	6,053797	33,61	5,55
55	1,89	0,0	7,90	0,245263	3,033478	0,298208	3,715527	82,25	0,56	12,95128	15,74709	29,63	1,88
56	3,02	0,0	7,65	0,172866	1,747018	0,190831	4,773857	90,59	1,09	5,719479	6,313895	36,22	5,74
57	2,48	0,0	7,76	0,226722	0,361676	0,255561	0,747375	88,72	0,83	9,147748	10,31133	33,35	3,23
58	2,05	0,0	7,66	0,133583	4,506561	0,191986	7,260946	69,58	0,70	6,515145	9,363558	34,08	3,64
59	3,19	0,1	7,91	0,297281	1,803008	0,372583	0,424067	79,79	1,10	9,316857	11,67685	34,56	2,96
60	3,34	0,0	7,67	0,219174	1,916286	0,340347	1,768783	64,40	1,26	6,556927	10,18202	37,62	3,69
61	3,82	0,0	8,03	0,177027	2,327329	0,262719	1,035327	67,38	1,23	4,634022	6,877177	32,13	4,67
62	5,20	0,0	8,04	0,282917	0,851840	0,440183	0,574761	64,27	1,50	5,435627	8,457159	28,85	3,41
63	4,27	0,2	7,90	0,135039	2,495575	0,236209	2,095602	57,17	1,34	3,160569	5,528456	31,44	5,69
64	3,57	0,1	7,75	0,129048	2,781911	0,199500	4,360902	64,69	1,25	3,611048	5,582467	34,93	6,26
65	2,80	1,8	7,57	0,160040	1,005999	0,267485	1,540273	59,83	1,02	5,706992	9,538433	36,27	3,80
66	4,81	0,0	7,71	0,094472	3,641291	0,189583	2,679565	49,83	1,71	1,965563	3,944447	35,64	9,04
67	2,73	0,0	7,91	0,190897	1,293891	0,254872	1,942151	74,90	0,87	7,003115	9,350029	31,81	3,40
68	2,96	0,1	7,93	0,117401	0,000000	0,171500	2,816327	68,46	1,02	3,970509	5,800163	34,63	5,97
69	3,25	0,0	8,08	0,273000	1,157509	0,351707	2,362762	77,62	1,05	8,389461	10,80819	32,33	2,99
70	4,03	0,0	7,65	0,212234	0,386366	0,313193	0,609848	67,76	1,43	5,266251	7,771398	35,58	4,58

Tabella 8 – Analisi chimica-fisica dei campioni di separato solido: pH, sostanza secca, carbonio, azoto, rapporto carbonio-azoto e rapporto azoto ammoniacale-azoto totale

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ ss	N _{tot} ss	C ss	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V. %	%					
1	21,50	0,0	8,66	0,183195	2,663828	0,549500	1,945405	33,34	9,26	2,555814	0,852070	43,09	16,86
2	16,46	0,6	8,87	0,154000	2,623377	0,462000	1,409091	33,33	6,85	2,807195	0,935732	41,64	14,83
3	20,00	0,0	8,91	0,286829	5,993118	0,623897	2,958822	45,97	8,64	3,119487	1,434146	43,22	13,85
4	20,20	0,4	8,91	0,227500	1,775824	0,594146	0,082471	38,29	8,51	2,941282	1,126224	42,13	14,32
5	17,63	0,3	8,75	0,197661	0,227663	0,550233	1,839221	35,92	7,56	3,120883	1,121119	42,89	13,74
6	14,95	2,4	8,81	0,207519	3,233439	0,460833	6,032554	45,03	6,17	3,082024	1,387876	41,26	13,39
7	17,85	0,6	8,97	0,309688	2,689804	0,477436	45,72341	64,86	7,47	2,674831	1,735026	41,83	15,64
8	18,21	0,0	8,98	0,211876	7,608224	0,584253	2,437300	36,26	7,69	3,208992	1,163726	42,26	13,17
9	19,77	1,0	9,00	0,200769	5,239853	0,523333	6,305737	38,36	8,49	2,646662	1,015353	42,94	16,22
10	17,65	0,0	8,53	0,193846	5,236115	0,478603	2,837425	40,50	7,41	2,711845	1,098366	42,00	15,49
11	16,95	0,4	8,93	0,287000	3,449477	0,567179	0,011081	50,60	6,89	3,345398	1,692814	40,61	12,14
12	19,82	0,6	8,89	0,224768	3,919597	0,601915	8,243689	37,34	8,52	3,036161	1,133770	42,96	14,15
13	21,09	5,4	8,98	0,169242	2,150766	0,433414	17,26063	39,05	9,23	2,054923	0,802420	43,76	21,30
14	13,56	0,0	8,68	0,184701	4,991852	0,443333	0,902256	41,66	5,89	3,269399	1,362090	43,43	13,28
15	17,85	0,6	8,94	0,214989	4,735126	0,579779	3,116705	37,08	7,58	3,247950	1,204381	42,47	13,08
16	18,53	0,8	9,17	0,220775	3,773072	0,612791	1,664515	36,03	7,99	3,307576	1,191648	43,15	13,05
17	21,50	0,3	9,09	0,148374	4,724547	0,331556	0,757037	44,75	6,45	1,542317	0,690200	29,98	19,44
18	16,11	1,4	8,90	0,327881	8,869071	0,752984	0,804798	43,54	7,61	4,674521	2,035482	47,25	10,11
19	17,49	0,4	9,04	0,220263	0,726404	0,523798	0,775108	42,05	7,25	2,994824	1,259356	41,43	13,83
20	20,27	0,7	8,12	0,210318	4,493196	0,506350	1,384418	41,54	9,24	2,497520	1,037373	45,55	18,24
21	17,03	0,6	9,32	0,178333	2,506547	0,462000	2,142857	38,60	6,74	2,713631	1,047470	39,56	14,58
22	15,91	0,7	9,13	0,217000	0,506912	0,540799	6,899051	40,13	6,91	3,399271	1,363985	43,44	12,78
23	15,72	0,6	9,17	0,208158	1,253855	0,491086	2,146264	42,39	6,49	3,124821	1,324525	41,29	13,21
24	15,91	2,7	9,27	0,202103	4,270100	0,450017	0,224436	44,91	6,76	2,828944	1,270478	42,50	15,02
25	20,41	1,0	9,37	0,325616	2,014643	0,627680	10,63281	51,88	8,37	3,074809	1,595092	41,02	13,34
26	19,45	3,1	9,19	0,255874	2,536405	0,600000	9,428333	42,65	7,96	3,085535	1,315845	40,94	13,27
27	19,60	0,9	9,37	0,153815	2,262458	0,331646	7,097930	46,38	7,81	1,691831	0,784659	39,82	23,54
28	23,39	6,6	9,01	0,304167	5,036707	0,589064	24,17394	51,64	8,85	2,518559	1,300473	37,84	15,02
29	23,51	0,7	9,26	0,222648	6,880816	0,510192	2,791106	43,64	9,95	0,946969	2,169959	42,31	19,50
30	18,83	1,7	9,29	0,192419	10,49273	0,523590	3,999312	36,75	7,31	1,021767	2,780327	38,80	13,95
31	17,85	1,9	9,53	0,233477	2,167237	0,502846	12,26021	46,43	7,14	1,307699	2,816430	39,99	14,20
32	18,60	0,3	9,22	0,229056	38,06929	0,551053	4,152051	41,57	7,95	1,231700	2,963173	42,76	14,43
33	18,40	0,5	8,83	0,367099	4,644524	0,725285	6,055551	50,61	7,98	1,995637	3,942825	43,40	11,01
34	18,57	2,1	9,04	0,162451	11,67737	0,423500	0,460449	38,36	8,30	0,874761	2,280446	44,68	19,59
35	16,32	1,9	8,86	0,255263	0,803093	0,509942	4,853493	50,06	6,48	1,564308	3,125034	39,71	12,71
36	14,81	0,7	9,15	0,303256	2,209354	0,563415	3,780517	53,82	6,05	2,048184	3,805291	40,87	10,74

Cod.	SS		pH	N-NH ₄ t.q.		N _{tot} t.q.		(N-NH ₄ /N _{tot})	C t.q.	N-NH ₄ ss	N _{tot} ss	C ss	C/N
	%	C.V. %		%	C.V. %	%	C.V %	%					
37	16,42	0,0	8,95	0,195967	12,08367	0,474634	1,017626	41,29	6,81	1,193242	2,890038	41,45	14,34
38	15,64	0,7	8,84	0,227431	3,143811	0,430156	16,8404	52,87	6,40	1,453991	2,750038	40,89	14,87
39	18,22	0,6	9,01	0,317240	6,414702	0,661476	2,938882	47,96	7,24	1,741294	3,630760	39,75	10,95
40	18,16	0,5	8,98	0,255561	3,858179	0,572657	0,237489	44,63	7,55	1,407287	3,153424	41,58	13,18
41	23,04	0,7	8,95	0,176154	4,291699	0,372248	2,444607	47,32	9,34	0,764399	1,615327	40,54	25,10
42	17,06	0,6	8,78	0,189118	2,876511	0,462955	0,330486	40,85	7,29	1,108810	2,714327	42,74	15,75
43	15,87	0,0	9,05	0,195083	3,429310	0,457561	2,458689	42,64	6,21	1,229449	2,883627	39,15	13,58
44	17,21	0,0	8,80	0,249289	2,190229	0,534970	1,805709	46,60	7,37	1,448622	3,108722	42,80	13,77
45	20,23	0,0	9,05	0,166409	15,28163	0,478692	3,634905	34,76	8,81	0,822387	2,365678	43,55	18,41
46	19,65	0,0	8,96	0,298261	2,564868	0,587915	4,015887	50,73	7,76	1,517591	2,991387	39,47	13,19
47	19,77	1,2	8,54	0,163833	1,538152	0,480667	6,203879	34,08	7,94	0,828703	2,431313	40,17	16,52
48	18,07	0,6	8,92	0,116383	3,445520	0,404293	11,42736	28,79	7,33	0,644114	2,237527	40,56	18,13
49	20,50	0,4	8,91	0,269756	0,793310	0,574179	3,026931	46,98	8,15	1,315887	2,800883	39,74	14,19
50	20,78	0,3	8,45	0,198049	7,316371	0,396936	0,062982	49,89	6,41	0,953298	1,910630	30,86	16,15
51	27,48	0,8	8,85	0,188943	0,635112	0,808173	0,361309	23,38	10,82	0,687627	2,941211	39,37	13,38
52	26,92	0,0	8,65	0,131783	2,443411	0,406000	8,817734	32,46	8,00	0,489583	1,508318	29,70	19,69
53	13,40	0,2	8,76	0,267882	0,817524	0,655667	1,509913	40,86	5,18	1,999550	4,894083	38,64	7,89
54	20,92	0,6	8,81	0,152122	3,608945	0,504140	0,654580	30,17	7,52	0,727275	2,410227	35,96	14,92
55	18,21	0,5	8,81	0,249773	1,064967	0,536781	1,475462	46,53	6,65	1,371684	2,947854	36,50	12,38
56	13,95	0,6	8,57	0,153218	4,405488	0,453020	4,949009	33,82	4,94	1,098628	3,248315	35,42	10,90
57	20,67	0,3	8,58	0,196397	1,838114	0,463696	2,404593	42,35	9,42	0,950009	2,242988	45,55	20,31
58	19,17	0,2	8,57	0,152564	11,64757	0,479500	7,226277	31,82	8,46	0,795934	2,501574	44,13	17,64
59	23,79	0,2	8,60	0,270870	4,766124	0,584769	0,781505	46,32	10,76	1,138735	2,458368	45,23	18,40
60	23,60	0,6	8,58	0,245153	3,536567	0,535641	1,150024	45,77	10,66	1,038577	2,269210	45,14	19,89
61	26,94	2,7	8,94	0,181163	0,905262	0,788667	0,836855	22,97	12,46	0,672530	2,927766	46,27	15,81
62	16,65	0,7	8,77	0,375362	0,764595	0,555333	1,188476	67,59	9,01	2,254866	3,335982	54,11	16,22
63	14,92	0,1	8,58	0,133000	2,090226	0,367312	2,602692	36,21	6,60	0,891436	2,461918	44,25	17,97
64	19,00	0,7	8,84	0,159037	0,000000	0,439489	1,938615	36,19	7,54	0,837143	2,313398	39,67	17,15
65	21,15	0,0	8,50	0,207519	0,583079	0,424667	1,554159	48,87	8,67	0,981388	2,008308	41,00	20,41
66	18,67	1,1	8,88	0,095455	0,000000	0,397419	0,000000	24,02	7,83	0,511406	2,129207	41,97	19,71
67	18,14	0,4	8,65	0,185606	0,808164	0,439310	1,554711	42,25	7,37	1,023298	2,422040	40,62	16,77
68	18,53	3,6	8,88	0,147635	2,499407	0,466667	0,000000	31,64	8,01	0,796921	2,519029	43,23	17,16
69	25,18	0,5	8,62	0,251417	0,326151	0,499811	2,174822	50,30	11,32	0,998552	1,985098	44,96	22,65
70	22,91	0,3	8,66	0,209964	1,071612	0,704667	0,936613	29,80	9,75	0,916471	3,075798	42,56	13,84

Tabella 9 – Analisi chimica dei campioni di digestato integrale: fosforo, potassio, magnesio, calcio e sodio

Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
1	0,102783	0,641364	0,144235	0,900024	0,111573	0,696218	0,559580	3,491779	0,419114	2,615271
2	0,407319	2,936766	0,473939	3,417102	0,070209	0,506205	0,728908	5,255427	0,230890	1,664720
3	0,211021	1,287230	0,319130	1,946691	0,148725	0,907221	0,431974	2,635041	0,310891	1,896436
4	0,261745	1,232820	0,497959	2,345388	0,102226	0,481483	1,110866	5,232181	0,425531	2,004250
5	0,088446	0,483799	0,147799	0,808463	0,117167	0,640906	0,616250	3,370889	0,446133	2,440349
6	0,119377	0,652992	0,181112	0,990680	0,151951	0,831169	0,813014	4,447184	0,900135	4,923738
7	0,334024	2,037544	0,431165	2,630107	0,067056	0,409042	0,790829	4,824057	0,217424	1,326286
8	0,224643	1,386047	0,330990	2,042208	0,123420	0,761501	0,438790	2,707334	0,257400	1,588158
9	0,288544	1,915932	0,330460	2,194251	0,103359	0,686304	0,750339	4,982251	0,324542	2,154959
10	0,170202	1,160780	0,185243	1,263358	0,156951	1,070408	0,898597	6,128433	0,661621	4,512254
11	0,340842	2,195021	0,425448	2,739885	0,056851	0,366119	0,663674	4,274061	0,232877	1,499727
12	0,454914	2,929647	0,537178	3,459423	0,172791	1,112774	0,677488	4,363023	0,366885	2,362739
13	0,152929	0,954277	0,225671	1,408186	0,058318	0,363906	0,504556	3,148427	0,206992	1,291628
14	0,116420	0,653114	0,164439	0,922501	0,151440	0,849578	0,795817	4,464534	0,541777	3,039367
15	0,217924	1,144100	0,389028	2,042398	0,070209	0,368595	0,620887	3,259658	0,226844	1,190932
16	0,217881	1,030577	0,418380	1,978937	0,136634	0,646279	0,506020	2,393473	0,255762	1,209756
17	0,340889	2,212367	0,404040	2,622220	0,110110	0,714614	0,823160	5,342308	0,374530	2,430700
18	0,090611	0,299923	0,256320	0,848419	0,057565	0,190541	0,857711	2,839023	0,202813	0,671312
19	0,188074	0,804957	0,404255	1,730213	0,048154	0,206100	0,612851	2,623001	0,368276	1,576220
20	0,067338	0,462615	0,087438	0,600699	0,096630	0,663849	0,535950	3,681977	0,257045	1,765901
21	0,381096	2,019808	0,659073	3,493087	0,044840	0,237653	0,508624	2,695708	0,227910	1,207922
22	0,564436	3,533372	0,827967	5,183072	0,055539	0,347674	0,644361	4,033702	0,323869	2,027417
23	0,122562	0,838324	0,160129	1,095282	0,100710	0,688856	0,517202	3,537660	0,256587	1,755053
24	0,532853	3,447561	0,426723	2,760898	0,359559	2,326347	1,927877	12,47336	1,315874	8,513705
25	0,415990	2,304583	0,670432	3,714193	0,082880	0,459155	0,815808	4,519576	2,560444	14,18486
26	0,388905	2,788447	0,402378	2,885050	0,104740	0,750983	0,785075	5,628989	0,514262	3,687259
27	0,081787	0,194654	0,291224	0,693113	0,070210	0,167100	0,899396	2,140562	0,267034	0,635541
28	0,270837	1,172723	0,551578	2,388331	0,061576	0,266625	0,792666	3,432244	0,548289	2,374091
29	0,078048	0,454242	0,116208	0,676329	0,110207	0,641405	0,644624	3,751714	0,352662	2,052495
30	0,496434	3,077892	0,761122	4,718956	0,063856	0,395910	0,596379	3,697549	0,341164	2,115214
31	0,522103	3,210935	0,759346	4,669975	0,060596	0,372663	0,598577	3,681250	0,384816	2,366616
32	0,094726	0,534256	0,162746	0,917890	0,104438	0,589033	0,519096	2,927701	0,309084	1,743234
33	0,365139	1,694245	0,606737	2,815258	0,066277	0,307524	0,891817	4,138032	0,584039	2,709941
34	0,174024	0,861421	0,340663	1,686283	0,044892	0,222215	0,538910	2,667606	0,204336	1,011463
35	0,136144	0,566360	0,319288	1,328236	0,070008	0,291231	0,406003	1,688970	0,324105	1,348277
36	0,284220	1,480785	0,494585	2,576789	0,063643	0,331581	0,782137	4,074935	0,218063	1,136109
37	0,090266	0,545206	0,130067	0,785603	0,123173	0,743964	0,560482	3,385312	0,549452	3,318689

Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
38	1,168910	6,569272	1,083851	6,091244	0,204757	1,150736	1,809041	10,16681	0,730755	4,106844
39	0,206231	0,647566	0,566196	1,777855	0,110084	0,345664	0,725232	2,277228	0,345564	1,085071
40	0,377493	2,238535	0,520509	3,086617	0,137098	0,812993	1,089082	6,458253	0,548026	3,249796
41	0,054665	0,186409	0,153406	0,523114	0,046712	0,159286	0,488642	1,666269	0,205656	0,701287
42	0,097562	0,609761	0,138508	0,865677	0,140424	0,877651	0,847504	5,296900	0,481905	3,011908
43	0,632703	3,884795	0,888328	5,454334	0,077604	0,476489	0,691360	4,244950	0,445440	2,735002
44	0,151572	0,880636	0,20904	1,214522	0,155750	0,904910	0,747677	4,344002	0,396864	2,305780
45	0,602610	3,175757	0,889863	4,689575	0,119762	0,631146	0,638038	3,362461	0,487658	2,569955
46	0,464651	2,420833	0,716917	3,735139	0,113702	0,592385	1,136767	5,922557	0,315603	1,644291
47	0,185762	0,977107	0,330983	1,740973	0,046094	0,242457	0,507038	2,667022	0,242743	1,276826
48	0,049973	0,251363	0,094349	0,474574	0,094454	0,475104	0,448262	2,254758	0,369077	1,856455
49	0,157284	0,846188	0,262668	1,413154	0,068672	0,369456	0,316649	1,703569	0,345698	1,859854
50	0,072078	0,422375	0,116477	0,682554	0,056285	0,329829	0,387024	2,267961	0,395894	2,319941
51	0,059882	0,285040	0,111825	0,532287	0,043538	0,207239	0,601650	2,863854	0,226913	1,080104
52	0,087755	0,353655	0,169989	0,685054	0,115546	0,465651	0,460904	1,857442	0,374949	1,511043
53	0,706516	2,246721	1,130661	3,595502	0,107093	0,340554	1,787168	5,683193	0,748862	2,381380
54	0,275099	1,400255	0,457638	2,329375	0,064010	0,325812	0,743440	3,784107	0,387959	1,974709
55	0,119458	0,293868	0,435128	1,070416	0,108810	0,267673	0,962327	2,367324	0,411469	1,012214
56	0,041365	0,261839	0,059732	0,378106	0,033039	0,209136	0,133140	0,842775	0,277657	1,757570
57	0,146446	0,581391	0,288415	1,145006	0,141969	0,563617	0,876627	3,480208	0,543831	2,159008
58	0,116375	0,409641	0,256885	0,904236	0,150064	0,528226	0,800900	2,819168	0,540283	1,901795
59	0,143145	0,531067	0,336974	1,250172	0,090684	0,336438	0,729823	2,707643	0,680932	2,526256
60	0,127286	0,636431	0,196581	0,982905	0,096348	0,481740	0,461668	2,308338	0,688422	3,442110
61	0,092099	0,581147	0,135397	0,854354	0,045599	0,287732	0,731962	4,618680	0,178840	1,128482
62	0,208660	1,245700	0,299242	1,786472	0,083162	0,496475	0,354722	2,117688	0,415341	2,479585
63	0,410243	2,305564	0,564992	3,175253	0,092895	0,522069	0,916157	5,148803	0,455688	2,560969
64	0,060750	0,239354	0,138161	0,544354	0,095083	0,374628	0,385355	1,518298	0,314042	1,237327
65	0,107893	0,605278	0,147940	0,829943	0,078650	0,441227	0,564720	3,168079	0,32097	1,800642
66	0,097161	0,545075	0,151658	0,850799	0,082567	0,463199	0,579908	3,253282	0,292695	1,642017
67	0,060397	0,365401	0,078482	0,474819	0,106594	0,644891	0,610306	3,692349	0,379438	2,295597
68	0,095879	0,371050	0,220810	0,854533	0,140026	0,541899	0,654575	2,533204	0,582655	2,254873
69	0,133449	0,504437	0,325983	1,232216	0,211402	0,799098	0,982389	3,713432	0,588177	2,223310
70	0,156447	0,546002	0,400602	1,398101	0,106529	0,371786	0,832760	2,906332	0,793707	2,770036

Tabella 10 – Analisi chimica dei campioni di separato liquido: fosforo, potassio, magnesio, calcio e sodio

Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
1	0,168465	0,710924	0,263329	1,111249	0,176917	0,746591	0,356412	1,504057	0,499370	2,107343
2	0,463910	2,393777	0,839450	4,331561	0,095105	0,490741	0,521577	2,691337	0,531002	2,739969
3	0,281246	1,158735	0,580474	2,391551	0,141002	0,580930	0,752993	3,102330	0,386316	1,591622
4	0,185088	0,958754	0,345563	1,790015	0,066486	0,344399	0,764436	3,959780	0,333258	1,726277
5	0,069903	0,281710	0,168405	0,678672	0,120922	0,487316	0,743557	2,996535	0,442076	1,781566
6	0,303016	1,484780	0,506471	2,481707	0,061294	0,300342	0,780341	3,823671	0,280464	1,374272
7	0,195859	0,742305	0,486608	1,844246	0,096430	0,365468	0,622013	2,357431	0,249676	0,946273
8	0,153150	0,718274	0,317652	1,489788	0,055718	0,261316	0,688863	3,230767	0,271084	1,271382
9	0,058555	0,222510	0,151220	0,574634	0,099047	0,376378	0,643600	2,445682	0,389768	1,481117
10	0,264847	1,125599	0,582401	2,475204	0,037450	0,159163	0,841020	3,574335	0,237219	1,008181
11	0,190518	0,683958	0,508324	1,824882	0,102834	0,369174	0,655423	2,352969	0,260791	0,936240
12	0,254601	1,150795	0,466288	2,107622	0,077554	0,350542	0,993218	4,489344	0,392721	1,775098
13	0,066970	0,253816	0,162859	0,617234	0,122063	0,462617	0,648071	2,456187	0,610638	2,314318
14	0,360437	1,636383	0,653427	2,966559	0,088695	0,402675	0,974309	4,423361	0,306545	1,391712
15	0,339723	1,216209	0,789474	2,826315	0,132340	0,473778	0,716632	2,565544	0,505922	1,811200
16	0,221045	1,072068	0,421223	2,042930	0,081042	0,393053	0,760105	3,686509	0,348945	1,692383
17	0,129106	0,366662	0,454600	1,291064	0,051000	0,144840	1,781250	5,058750	0,307800	0,874152
18	0,140711	0,439019	0,413380	1,289745	0,053895	0,168154	0,559028	1,744169	0,410434	1,280555
19	0,084762	0,391600	0,176241	0,814235	0,152194	0,703137	0,959698	4,433804	0,363621	1,679930
20	0,288315	1,683760	0,253045	1,477781	0,144374	0,843144	1,937928	11,31750	0,908971	5,308390
21	0,088741	0,463228	0,144192	0,752681	0,078993	0,412343	1,079021	5,632489	0,523712	2,733776
22	0,163665	0,805232	0,273338	1,344824	0,147622	0,726301	0,833767	4,102132	0,354756	1,745397
23	0,100950	0,438124	0,207497	0,900537	0,117369	0,509380	0,778647	3,379326	0,489765	2,125580
24	0,262639	1,013785	0,658038	2,540025	0,077447	0,298944	0,963688	3,719836	0,329122	1,270412
25	0,274555	0,787974	0,911085	2,614814	0,108675	0,311897	1,033200	2,965284	0,339990	0,975771
26	0,200717	0,903227	0,424394	1,909772	0,061168	0,275257	0,825771	3,715968	0,299430	1,347435
27	0,092522	0,215576	0,391607	0,912444	0,050700	0,118131	0,887250	2,067293	0,266276	0,620424
28	0,285400	1,292864	0,529431	2,398322	0,071281	0,322903	0,726733	3,292100	0,559062	2,532551
29	0,030198	0,067945	0,130556	0,293751	0,095604	0,215109	0,626258	1,409080	0,254430	0,572468
30	0,447215	2,003525	0,952527	4,267322	0,042549	0,190619	0,722596	3,237230	0,317230	1,421189
31	0,090888	0,481708	0,164417	0,871412	0,054340	0,288004	0,835860	4,430059	0,403432	2,138192
32	0,177269	0,755167	0,357189	1,521625	0,174517	0,743442	1,076227	4,584727	0,450040	1,917168
33	0,203591	0,857117	0,473642	1,994032	0,047477	0,199876	0,760645	3,202315	0,382365	1,609755
34	0,295935	1,266601	0,645599	2,763163	0,065974	0,282367	0,928022	3,971932	0,329547	1,410460
35	1,467689	6,516538	1,715415	7,616444	0,353990	1,571715	1,133451	5,032521	1,439084	6,389531
36	0,313031	1,342903	0,695592	2,984089	0,078360	0,336166	0,436355	1,871962	0,256376	1,099851
37	0,124096	0,481493	0,304605	1,181867	0,180600	0,700728	0,341250	1,324050	0,733320	2,845282

Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
38	0,297991	1,260503	0,628992	2,660636	0,073472	0,310787	0,924448	3,910415	0,306768	1,297629
39	0,225990	0,677969	0,711330	2,133991	0,113207	0,339621	0,859379	2,578136	0,320559	0,961678
40	0,293619	1,274306	0,596597	2,589233	0,075751	0,32876	0,206325	0,895451	0,391457	1,698923
41	0,148409	0,396253	0,473055	1,263057	0,076258	0,203608	0,209150	0,558431	0,297628	0,794665
42	0,139875	0,664405	0,231504	1,099644	0,177826	0,844672	1,141111	5,420278	0,460464	2,187204
43	0,393106	1,886911	0,768266	3,687678	0,040401	0,193927	0,563914	2,706787	0,227165	1,090390
44	0,097545	0,404812	0,201068	0,834432	0,111289	0,461849	0,735535	3,052469	0,255310	1,059535
45	0,401308	1,745689	0,763698	3,322085	0,079607	0,346291	1,151586	5,009401	0,334374	1,454529
46	0,432374	1,932714	0,816960	3,651811	0,095667	0,427632	0,652022	2,914539	0,240470	1,074903
47	0,274097	1,066239	0,573329	2,230248	0,053462	0,207965	0,883159	3,435490	0,240024	0,933692
48	0,125726	0,497876	0,243661	0,964898	0,176557	0,699164	1,179736	4,671755	0,671827	2,660434
49	0,165999	0,871493	0,290881	1,527126	0,069785	0,366373	0,408277	2,143455	0,266859	1,401007
50	0,502959	1,559174	0,829898	2,572682	0,140956	0,436962	0,869975	2,696923	0,457470	1,418157
51	0,086119	0,337586	0,211648	0,829661	0,036745	0,144041	0,978892	3,837255	0,164315	0,644116
52	0,259169	0,865624	0,700952	2,341181	0,097084	0,324260	0,677269	2,262078	0,552836	1,846472
53	0,096973	0,328739	0,248745	0,843246	0,150880	0,511483	0,707250	2,397578	0,377890	1,281047
54	0,267436	1,115206	0,602756	2,513493	0,067138	0,279967	0,983242	4,100121	0,280151	1,168231
55	0,107113	0,202444	0,509198	0,962383	0,238182	0,450164	0,248879	0,470382	0,423163	0,799777
56	0,043640	0,131791	0,138944	0,419611	0,129064	0,389773	0,383760	1,158955	0,333840	1,008197
57	0,110642	0,274391	0,364193	0,903197	0,127400	0,315952	1,109483	2,751517	0,436835	1,083351
58	0,084110	0,172425	0,356465	0,730753	0,127761	0,261910	1,044533	2,141292	0,331258	0,679078
59	0,187965	0,59961	0,556931	1,776611	0,115322	0,367877	1,050653	3,351582	0,918979	2,931542
60	0,075163	0,251044	0,222151	0,741984	0,057235	0,191163	0,555833	1,856483	0,387270	1,293481
61	0,159918	0,610887	0,377828	1,443303	0,055178	0,210781	6,755722	25,80686	0,291626	1,114010
62	0,244781	1,272864	0,438299	2,279157	0,111266	0,578585	0,528945	2,750514	0,515520	2,680704
63	0,320739	1,369557	0,665320	2,840915	0,071466	0,305159	1,069615	4,567254	0,370538	1,582196
64	0,077670	0,277283	0,215623	0,769775	0,128244	0,457831	0,607014	2,167041	0,329338	1,175735
65	0,365150	1,022420	0,679931	1,903807	0,079981	0,223946	0,878444	2,459643	0,293646	0,822208
66	0,047982	0,230794	0,095277	0,458282	0,100303	0,482456	0,797186	3,834464	0,280177	1,347652
67	0,093367	0,254891	0,320527	0,875038	0,145966	0,398486	1,015891	2,773382	0,501277	1,368485
68	0,072379	0,214243	0,221089	0,654425	0,116241	0,344072	0,649775	1,923334	0,332685	0,984747
69	0,175927	0,571762	0,465846	1,513999	0,109344	0,355369	0,980379	3,186233	0,832573	2,705862
70	0,102802	0,414292	0,234244	0,944003	0,100297	0,404197	0,555281	2,237783	0,683456	2,754329

Tabella 11 – Analisi chimica dei campioni di digestato separato solido: fosforo, potassio, magnesio, calcio e sodio

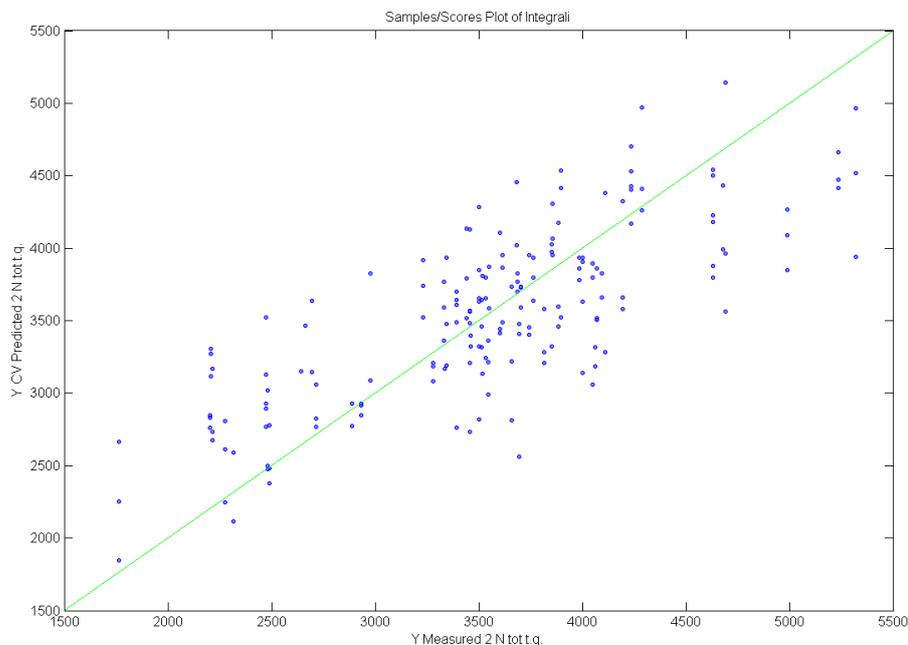
Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
1	0,457230	9,830438	0,160745	3,456007	0,081894	1,760715	0,274655	5,905078	0,486732	10,46473
2	0,177662	2,924310	0,100405	1,652666	0,065468	1,077595	0,185545	3,054071	0,301108	4,956229
3	0,396755	7,935102	0,197587	3,951744	0,155921	3,118424	0,359432	7,188640	0,446178	8,923552
4	0,135175	2,730545	0,066256	1,338371	0,069791	1,409778	0,181901	3,674400	0,401778	8,115916
5	0,298716	5,266357	0,164341	2,897339	0,052375	0,923368	0,270122	4,762251	0,218675	3,855242
6	0,320035	4,784527	0,211115	3,156166	0,178768	2,672585	0,289091	4,321916	0,515720	7,710020
7	0,395093	7,052419	0,216365	3,862106	0,084500	1,508321	0,367564	6,561016	0,570629	10,18573
8	0,091670	1,669314	0,047224	0,859945	0,075153	1,368536	0,170134	3,098133	0,341120	6,211795
9	0,263665	5,212662	0,133233	2,634018	0,063764	1,260608	0,224524	4,438845	0,249349	4,929632
10	0,228210	4,027901	0,129947	2,293565	0,125370	2,212781	0,178702	3,154090	0,462974	8,171482
11	0,087664	1,485902	0,051207	0,867959	0,058580	0,992931	0,169983	2,881212	0,393092	6,662909
12	0,772144	15,30389	0,237838	4,713941	0,074857	1,483658	0,379688	7,525424	0,550204	10,90505
13	0,296539	6,253998	0,121737	2,567433	0,097829	2,063203	0,149804	3,159356	0,465465	9,816657
14	0,115739	1,569421	0,083762	1,135810	0,053701	0,728190	0,155296	2,105808	0,289702	3,928355
15	0,106840	1,907094	0,057998	1,035271	0,055109	0,983692	0,157070	2,803707	0,298970	5,336622
16	0,239562	4,439080	0,128640	2,383699	0,036582	0,677864	0,190548	3,530854	0,554861	10,28157
17	0,125798	2,704654	0,058104	1,249234	0,053270	1,145311	0,919995	19,77990	0,219929	4,728469
18	0,197981	3,189469	0,113161	1,823027	0,038662	0,622838	0,335140	5,399099	0,453948	7,313102
19	0,366053	6,402266	0,202020	3,533330	0,053768	0,940409	0,170111	2,975245	0,275990	4,827072
20	0,246620	4,998989	0,121183	2,456375	0,013353	0,270669	0,211342	4,283902	0,316762	6,420766
21	0,340950	5,806380	0,197636	3,365746	0,047712	0,812540	0,166031	2,827503	0,152862	2,603235
22	0,272312	4,332482	0,112161	1,784482	0,128031	2,036980	0,408663	6,501825	0,265371	4,222059
23	0,073071	1,148683	0,045173	0,710121	0,071104	1,117753	0,292133	4,592332	0,277727	4,365870
24	0,164240	2,613064	0,101806	1,619727	0,051410	0,817930	0,173597	2,761925	0,098865	1,572942
25	0,200994	4,102295	0,096264	1,964754	0,127568	2,603665	0,151404	3,090156	0,265980	5,428652
26	0,229025	4,454528	0,110981	2,158573	0,117559	2,286519	0,244030	4,746384	0,268964	5,231340
27	0,079760	1,563296	0,040093	0,785813	0,057652	1,129979	0,131849	2,584231	0,430665	8,441024
28	0,205392	4,804108	0,084597	1,978724	0,047748	1,116826	0,102139	2,389036	0,887905	20,76810
29	0,128427	3,019317	0,053451	1,256624	0,059787	1,405592	0,196428	4,618032	0,209714	4,930386
30	0,484293	9,119245	0,249944	4,706447	0,123583	2,327066	0,172255	3,243554	0,314565	5,923265
31	0,387989	6,925599	0,214360	3,826319	0,079700	1,422652	0,176943	3,158433	0,242650	4,331306
32	0,179568	3,339964	0,093730	1,743378	0,069834	1,298912	0,300966	5,597968	0,458865	8,534889
33	0,201952	3,715918	0,105131	1,934407	0,034556	0,635838	0,172991	3,183031	0,379181	6,976927
34	0,642411	11,92957	0,241578	4,486111	0,089357	1,659356	0,397237	7,376687	0,297713	5,528527
35	0,151630	2,474609	0,091900	1,499806	0,039126	0,638531	0,117579	1,918894	0,315735	5,152800
36	0,223705	3,313065	0,147943	2,191034	0,081476	1,206657	0,238914	3,538316	0,292108	4,326121
37	0,095863	1,574068	0,056408	0,926211	0,105881	1,738558	0,225527	3,703145	0,371048	6,092600

Cod.	P		K		Mg		Ca		Na	
	t.q. (g/kg)	ss (g/kg)								
38	0,256826	4,016751	0,155209	2,427463	0,064538	1,009374	0,226941	3,549357	0,116168	1,816874
39	0,357711	6,517499	0,190426	3,469556	0,247131	4,502721	0,321466	5,857107	0,503953	9,182020
40	0,009838	0,178653	0,005358	0,097307	0,001719	0,031212	0,006066	0,110159	0,052774	0,958379
41	0,088078	2,029319	0,038114	0,878147	0,073620	1,696209	0,245234	5,650180	0,190971	4,399976
42	0,383983	6,550753	0,216838	3,699260	0,069131	1,179371	0,205628	3,508010	0,233965	3,991446
43	0,342171	5,430256	0,213898	3,394555	0,073282	1,162979	0,211478	3,356162	0,212486	3,372159
44	0,257038	4,423618	0,098453	1,694381	0,136682	2,352292	0,357102	6,145722	0,352854	6,072621
45	0,302097	6,111424	0,143450	2,901989	0,085778	1,735297	0,229645	4,645710	0,266288	5,387002
46	0,344858	6,776458	0,169238	3,325535	0,105256	2,068271	0,276672	5,436597	0,629874	12,37702
47	0,293529	5,803063	0,143036	2,827830	0,089787	1,775089	0,237806	4,701421	0,213620	4,223275
48	0,098417	1,778402	0,051237	0,925845	0,103324	1,867057	0,192935	3,486326	0,297534	5,376434
49	0,273472	5,606171	0,124557	2,553425	0,061154	1,253659	0,161721	3,315281	0,631890	12,95375
50	0,091640	1,904275	0,044100	0,916398	0,075500	1,568890	0,207400	4,309772	0,288300	5,990874
51	0,121798	3,347019	0,042577	1,170013	0,041432	1,138546	0,121901	3,349842	0,143033	3,930558
52	0,235552	6,341068	0,086038	2,316148	0,052782	1,420900	0,177467	4,777398	0,305303	8,218768
53	0,168594	2,259161	0,118919	1,593517	0,057873	0,775493	0,205887	2,758883	0,167799	2,248504
54	0,131457	2,750089	0,062216	1,301559	0,070599	1,476931	0,479649	10,03426	0,206646	4,323034
55	0,082405	1,500596	0,043596	0,793883	0,080030	1,457343	0,360601	6,566548	0,311815	5,678155
56	0,087586	1,221828	0,041553	0,579657	0,063160	0,881079	0,314137	4,382210	0,244933	3,416817
57	0,054401	1,124458	0,026058	0,538619	0,046965	0,970767	0,171397	3,542776	0,216140	4,467614
58	0,355702	6,818808	0,180147	3,453418	0,144715	2,774187	0,382748	7,337279	0,221450	4,245197
59	0,013735	0,326756	0,005584	0,132834	0,127182	3,025660	0,008996	0,214010	0,016544	0,393582
60	0,206334	4,869480	0,083108	1,961349	0,049549	1,169361	0,111091	2,621752	0,439841	10,38025
61	0,164604	4,434443	0,057970	1,561712	0,053016	1,428256	0,213857	5,761297	0,110670	2,981450
62	0,151227	2,517927	0,089046	1,482616	0,046308	0,771028	0,113220	1,885113	0,434418	7,233060
63	0,214463	3,199784	0,141757	2,115017	0,077977	1,163411	0,241636	3,605212	0,185156	2,762533
64	0,088504	1,681576	0,044962	0,854286	0,048485	0,921211	0,133437	2,535299	0,132608	2,519552
65	0,126047	2,665891	0,055131	1,166021	0,125720	2,658984	0,216524	4,579489	0,379215	8,020393
66	0,112947	2,108714	0,055654	1,039068	0,063590	1,187216	0,147506	2,753935	0,211856	3,955357
67	0,044895	0,814404	0,024725	0,448506	0,056056	1,016856	0,201601	3,657049	0,173473	3,146806
68	0,399900	7,410140	0,142733	2,644839	0,182045	3,373290	0,403855	7,483437	1,531958	28,38719
69	0,135731	3,417711	0,049958	1,257935	0,034528	0,869415	0,097326	2,450664	0,428147	10,78075
70	0,123672	2,833328	0,051168	1,172247	0,049163	1,126324	0,113940	2,610365	0,585209	13,40713

2.5 Modello di calibrazione

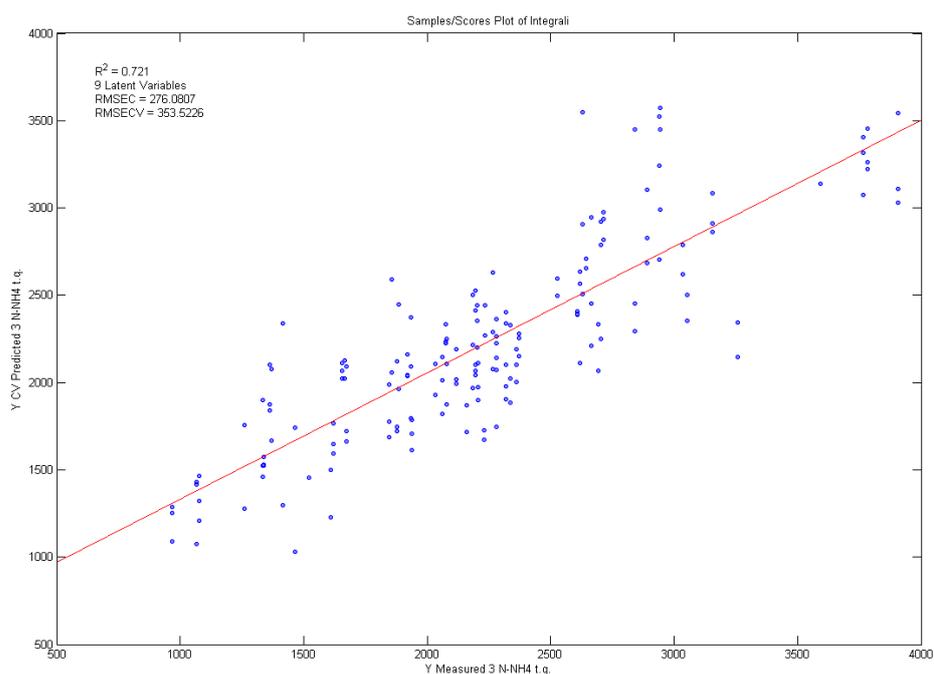
Per i digestati integrali il modello di calibrazione per il contenuto in azoto totale sul tal quale è stato determinato raggruppando la popolazione in 8 classi. Il modello di calibrazione ha prodotto un valore di R^2 di 0,739 con coefficiente di variazione (CV) di 0,597.

Figura 7 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in azoto totale del digestato integrale tal quale



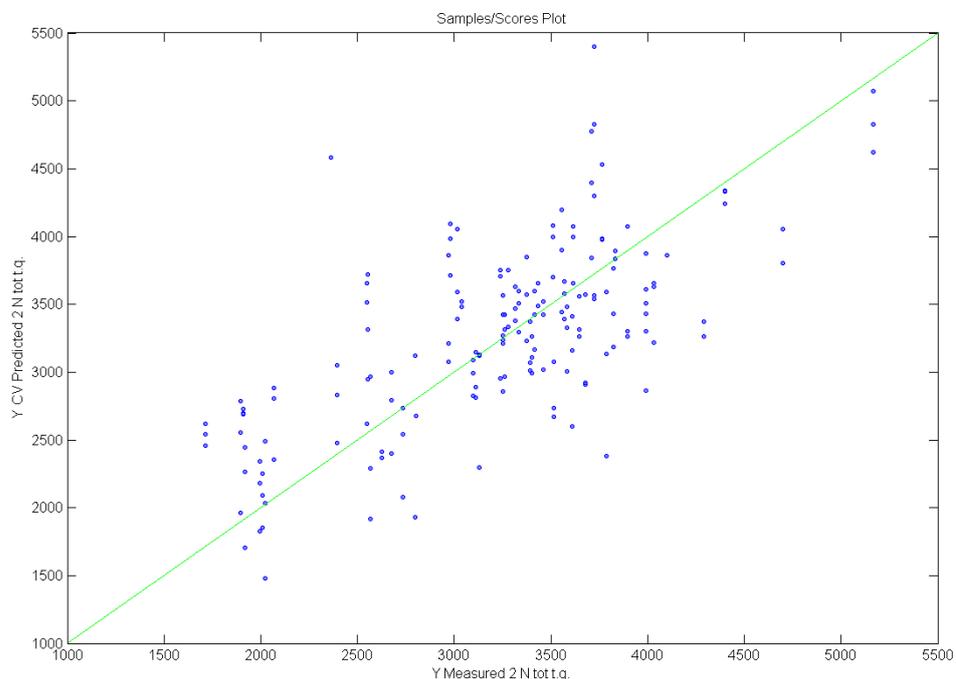
Il modello di calibrazione per il contenuto in azoto ammoniacale sul tal quale è stato determinato raggruppando la popolazione in 9 classi. Ha prodotto un valore di R^2 di 0,830 con CV di 0,721.

Figura 8 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in ammonio del digestato integrale tal quale



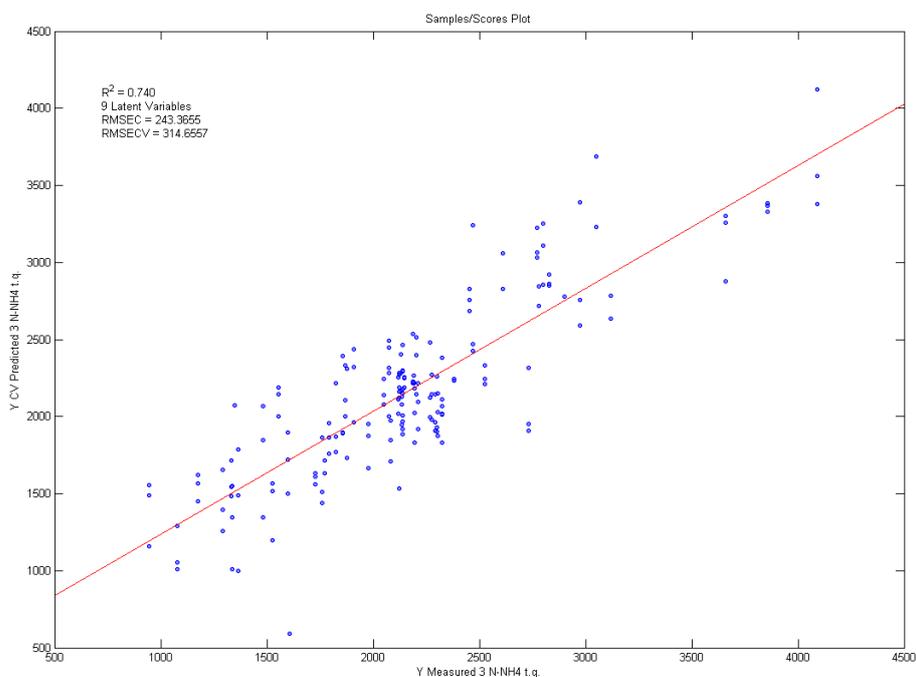
Per il separato liquido il modello di calibrazione per il contenuto in azoto totale sul tal quale la popolazione è stata raggruppata in 10 classi. Il modello di calibrazione ha fornito un valore di 0,769 con CV di 0,573.

Figura 9 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in azoto totale del digestato separato liquido tal quale



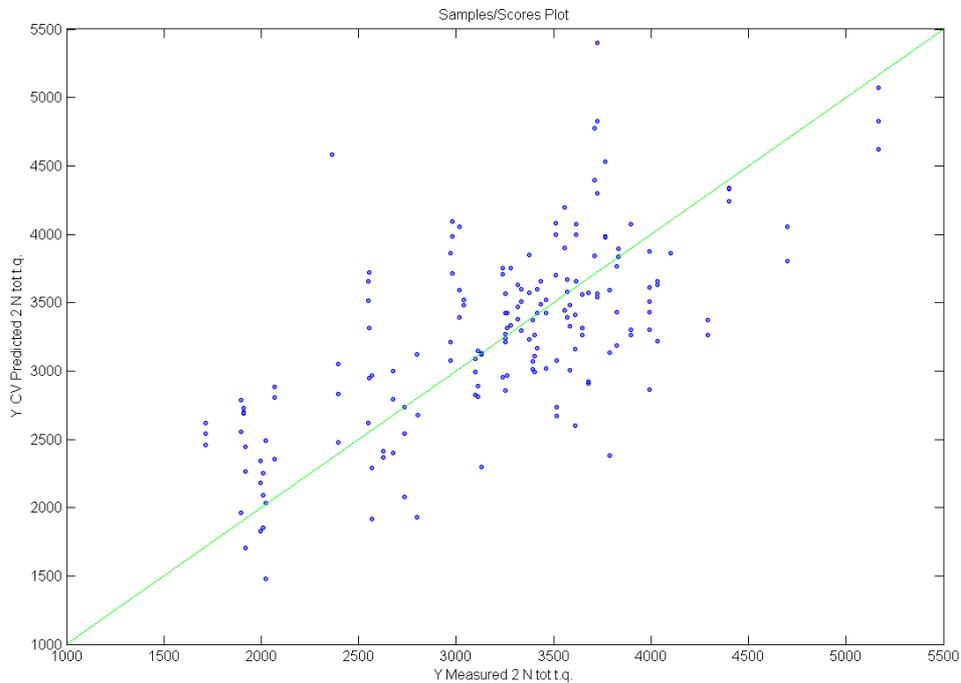
Il modello di calibrazione per il contenuto in azoto ammoniacale sul tal quale del digestato separato liquido ha raggruppato la popolazione in 9 classi. Il modello di calibrazione ha prodotto un valore di R^2 0,842 con CV di 0,740.

Figura 10 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in azoto ammoniacale del digestato separato liquido tal quale



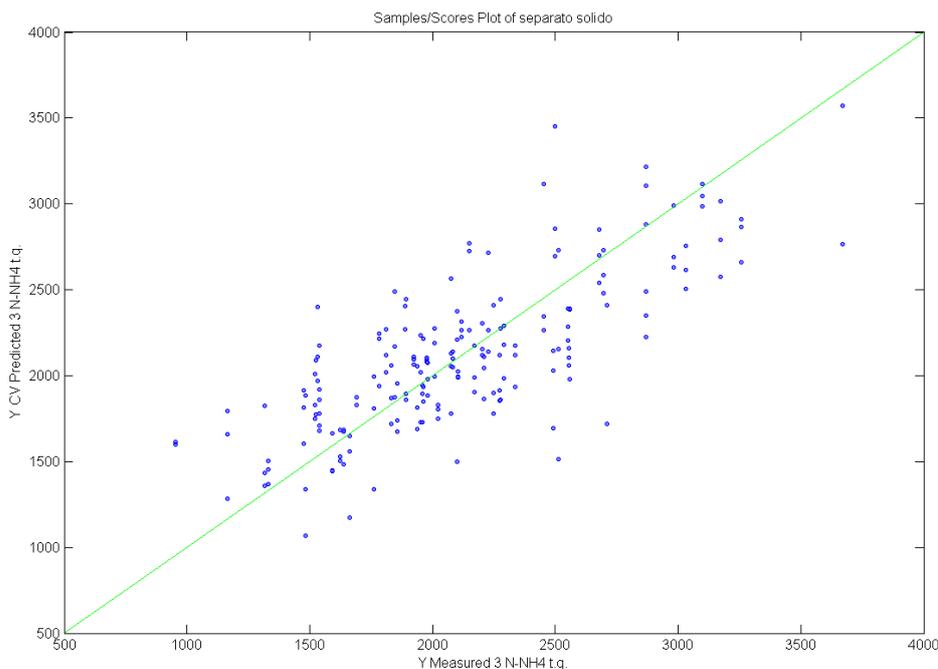
Il modello di calibrazione per il contenuto in azoto totale sul tal quale del digestato separato solido ha raggruppato la popolazione in 9 classi. Il modello di calibrazione ha prodotto un valore di R^2 0,722 con CV di 0,584.

Figura 11 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in azoto totale del digestato solido tal quale



Il modello di calibrazione per il contenuto in azoto ammoniacale sul tal quale del digestato separato solido ha raggruppato la popolazione in 8 classi. Ha prodotto un valore di R^2 0,742 con CV di 0,578.

Figura 12 – Distribuzione dei campioni rispetto al modello di calibrazione del contenuto in azoto ammoniacale del digestato separato liquido tal quale



2.5.1 Conclusioni modelli di calibrazione

I modelli di calibrazione prodotti per l'azoto totale e per l'azoto ammoniacale, sul tal quale dei digestati integrali e delle due frazioni, mostra una buona efficacia di descrizione dei singoli campioni, infatti i valori di R^2 delle rette interpolanti la dispersione (modello) dei valori analitici dei campioni è compresa tra il 75% e l'85% con coefficienti di variazione (CV) compresi tra il 55% e il 75%.

2.6 Conclusioni

- 1) Le caratteristiche chimico-fisiche dei digestati sono condizionate naturalmente dalla razione del fermentatore anaerobico, ma anche il regime termico del digestore condiziona pesantemente il contenuto in sostanza secca del digestato tal quale, altra condizione che influenza il contenuto in azoto, fosforo e ioni è il ricircolo del digestato. In condizioni di carenza di liquame, come nel caso di allevamenti che praticano il "tutto pieno tutto vuoto" ovvero che presentano periodi in cui non vi è disponibilità di liquame fresco, diventa necessario riciclare il digestato come frazione liquida della razione del digestore. Tale pratica porta alla concentrazione di ioni, fosforo ed azoto.
- 2) La sperimentazione ha presupposto di produrre dati in condizioni quanto più vicine alle situazioni operative di distribuzione di pieno campo dei digestati. Infatti le analisi chimiche e le scansioni NIRs sono state fatte su campione fresco senza sottoporlo a macinazione.
- 3) L'essiccazione e la macinazione del prodotto avrebbero facilitato le analisi chimico-fisiche e la determinazione degli spettri NIRs, in particolar modo i campioni con un notevole contenuto in acqua potrebbero portare all'estinzione delle radiazioni elettromagnetiche dello spettrometro. Tale preparazione delle campioni avrebbe però alterato la natura dello stesso creando condizioni molto diverse da quelle che si verificano in condizioni di pieno campo.
- 4) La tecnica di scansione NIRs utilizzando campioni sigillati in sacchetti di polietilene, si è dimostrata estremamente pratica, in termini operativi, e sufficientemente efficiente ai fini della produzione di spettri NIRs.
- 5) La determinazione del contenuto di azoto in campioni di digestato integrale e nelle diverse frazioni prodotte dalla separazione è una tecnica già affidabile anche se suscettibile di ulteriori miglioramenti.
- 6) È possibile inoltre progettare e realizzare un sistema *on line* sui carri distributori o sistemi "fissi" prossimità delle strutture di stoccaggio dei digestati per analizzare il materiale nelle fasi di carico dei carri distributori.
- 7) Naturalmente l'utilizzo di un sistema in grado di analizzare il materiale nel momento della distribuzione produce un dato puntuale che unito ad un sistema GPS può essere spazializzato.
- 8) La qualità della determinazione è sufficientemente buona per la stima del contenuto di sostanza secca, di azoto totale e ammoniacale sul tal quale.

3. STUDIO DELLA MINERALIZZAZIONE DEI REFLUI ANAEROBICI (DIGESTATO DA FERMENTAZIONE ANAEROBICA)

Lo studio ha lo scopo di studiare la mineralizzazione nel suolo dei digestati prodotti negli impianti di fermentazione anaerobica per la produzione di biogas, con l'obiettivo di approfondire le dinamiche nel suolo dell'azoto contenuto nella varie frazioni di detto digestato.

Al fine di realizzare la sperimentazione in condizioni standard si è optato per la produzione in laboratorio dei digestati, per poter disporre di un materiale di origine certa e caratterizzato dall'ingestato al digestato. È noto che i materiali di questo tipo disponibili presso i diversi impianti non sono facilmente caratterizzabili data la continua variazione degli alimenti e delle tecnologie impiantistiche.

Per effettuare questa sperimentazione sono stati presi in considerazione due differenti liquami, suino e bovino, e due differenti biomasse per la cofermentazione: trinciato di mais e FORSU.

I digestati sono stati ottenuti dalle seguenti combinazioni di materiali:

- solo liquame bovino;
- liquame bovino + trinciato di mais;
- liquame bovino + FORSU;
- solo liquame suino;
- liquame suino + trinciato di mais;
- liquame suino + FORSU.

3.1 La sperimentazione

Sono state previste due fasi distinte: una per preparare i materiali da utilizzare nella sperimentazione e la seconda più specifica e relativa alla mineralizzazione degli effluenti di digestione anaerobica.

3.1.1 Preparazione dei materiali da impiegare per le prove di mineralizzazione

3.1.1.1 Suolo:

- individuazione della tipologia di suolo più consona alla sperimentazione;
- raccolta e caratterizzazione di diversi campioni di suolo;
- individuazione del suolo con le caratteristiche chimico-fisiche e idrologiche più idoneo per la sperimentazione;
- preparazione di una quantità di suolo sufficiente per la ricerca.

Il suolo adatto alla sperimentazione avrebbe dovuto essere di tessitura sabbiosa o franca (indicativamente con un contenuto di argilla del 5-7%, per limitare al massimo la fissazione dell'azoto ammoniacale nei pacchetti argillosi), sub-acido (per limitare al massimo la volatilizzazione di ammoniaca) e a basso contenuto di sostanza organica (indicativamente con carbonio organico <1%, per ridurre il contributo all'emissione di CO₂ e la produzione di azoto minerale endogeno, e meglio visualizzare l'effetto netto dei materiali impiegati, facilitandone la misura).

I suoli sono stati raccolti in quattro aziende agricole della Lomellina, scelte per la loro natura sabbiosa, favorevole alla sperimentazione. Dopo il campionamento e prima dell'inizio della prova, il suolo è stato testato, effettuando una breve incubazione (10–15 giorni circa), con lo scopo di valutare la variabilità sperimentale tra le repliche. Le incubazioni sono state condotte a 25°C di temperatura e –50 kPa di potenziale idrico del terreno. Inoltre sono stati analizzati per i parametri interessanti ai fini della prova quali: tessitura, pH, contenuto in carbonio e in azoto totale (Tabella 12).

Tabella 12 – Analisi della tessitura, del pH, del carbonio e dell’azoto di quattro suoli recuperati in Lomellina

	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	pH H ₂ O	C (g/kg ss)	N (g/kg ss)	C/N
AMIOTTI DANIELE	77,85	17,03	5,64	6,48	28,5	2,5	11,4
BIFFI SERGIO	66,11	29,11	4,79	6,30	13,4	1,4	9,6
CANEVARI RAFFAELE	84,51	12,62	2,87	6,15	32,4	3,0	10,8
DE MARZIANI ALESSANDRO	85,43	11,66	2,92	6,27	30,2	2,9	10,4

Il suolo scelto per la sperimentazione è stato quello proveniente dall’azienda Amiotti Daniele. Sono stati prelevati circa 100 kg di suolo dal campo, che trasportato presso i laboratori della Azienda Didattico-sperimentale “Baciocca” di Corrado (MI) di proprietà dell’Università degli Studi di Milano, è stato fatto asciugare all’aria ed è stato setacciato con setacci aventi fori del diametro di 2 mm. Il suolo così preparato è stato conservato in sacchi di plastica fino alla preparazione della prova di incubazione.

3.1.1.2 *Digestati:*

- individuazione della metodica di fermentazione più adeguata ai fini del progetto;
- costruzione delle apparecchiature per attuare la fermentazione;
- reperimento e caratterizzazione dei substrati;
- realizzazione delle fermentazioni e monitoraggio delle stesse;
- prelievo del digestato e sua separazione,
- caratterizzazione e conservazione dei digestati.

Il **sistema di fermentazione** è stato concepito per produrre digestato in condizioni del tutto simili alla realtà, ciò ha condotto a realizzare le fermentazioni in condizioni di *semi-batch*. Infatti la realizzazione di processi in condizioni di continuo avrebbe richiesto un lungo periodo di *start up* dei fermentatori, un sistema di fermentazione estremamente complicato che, naturalmente andava replicato per n. 6 volte, pari al numero dei fermentazioni. Invece un sistema *batch* avrebbe portato alla produzione di digestato fortemente condizionato dal materiale di inoculo utilizzato per avviare prontamente la fermentazione nelle proporzioni di 2:1 oppure 1,5:1 di sostanza secca dell’inoculo sul substrato in fermentazione. La soluzione di *semi-batch* ha permesso di minimizzare l’impiego di inoculo, la fermentazione è stata realizzata utilizzando un rapporto inoculo:substrato del 2:1 sulla sostanza secca, su una quantità minima di materiale. Le fermentazioni sono state condotte con biomassa completamente agitata e alla temperatura di 40°C.

Il sistema di fermentazione consisteva in una batteria di n. 6 fermentatori da 50 L posti in due bagni termici (3 per ogni bagno) alla temperatura di 40°C. I fermentatori sono stati realizzati con fusti a bocca larga di materiale plastico per alimenti, chiudibili ermeticamente.

L’agitazione del materiale in fermentazione è stata ottenuta ponendo all’interno del fusto una pompa ad immersione con lo statore fenestrato, che veniva azionata attraverso un temporizzatore.

Tabella 13 – Schema del fermentatore

1	Valvola di alimentazione
2	Polmone per la raccolta del biogas
3	Cavo di alimentazione della pompa miscelatrice
4	Contenitore a tenuta stagna in materiale plastico
5	Guardia idraulica per l’alimentazione del fermentatore per il prelievo di campioni
6	Pompa miscelatrice

Il **sistema di alimentazione** consisteva in una valvola a chiusura ermetica del diametro di 2 pollici, posta sulla sommità del fermentatore, collegata ad una guardia idraulica costituita da un tubo in PVC del diametro di 5 cm, che attraversando il coperchio stesso andava a pescare sul fondo del fusto.

Tale sistema permetteva di alimentare il fermentatore e prelevare campioni di materiale in fermentazione senza alterare le condizioni di anaerobiosi del fermentatore.

L’alimentazione avveniva versando la miscela di ingestato attraverso la valvola aperta, la azione di miscelazione della pompa ad immersione favoriva lo svuotamento della guardia idraulica del tubo di alimentazione.

Sulla sommità del fermentatore era posta anche una valvola che permetteva l’uscita del biogas e che era collegata con un sacchetto di *nalophan* che fungeva da polmone.

Tutti i digestati sono stati prodotti miscelando un liquame zootecnico con una biomassa in rapporto 1:1. I fattori sperimentali usati nella produzione dei digestati sono stati:

- tipo di liquame (bovino e suino);
- tipo di biomassa (trinciato integrale di mais e FORSU).

I due tipi di liquame sono stati scelti poiché si presume che la diversa alimentazione e il diverso apparato digerente dei bovini (ruminanti) e dei suini (monogastrici) possano fornire liquami di diversa composizione.

Il **liquame bovino** è stato raccolto presso l'azienda didattica-sperimentale Menozzi di Landriano (PV) dell'Università degli Studi di Milano, prelevandolo dalle prime vasche di raccolta collocate ai margini della corsia di alimentazione.

Il **liquame suino** è stato prelevato in un allevamento di suini da ingrasso dell'hinterland milanese.

Tra le biomasse, il mais da trinciato è stato scelto perché è comunemente utilizzato nell'alimentazione degli impianti di digestione anaerobica e garantisce una buona produzione di biogas. In alternativa, si è pensato quindi di valutare anche il FORSU (la frazione umida del residuo solido urbano), che ha i vantaggi di essere facilmente reperibile, distribuito su tutto il territorio, ed a basso costo. Inoltre il FORSU, è diverso dal mais con un rapporto C/N inferiore, intorno a 16,5 e quindi presenta una maggiore fermentescibilità rispetto all'insilato che ha mostrato un rapporto C/N di 37,5.

Il **trinciato di mais** utilizzato è stato prelevato dal silo a trincea dell'Az. Agr. Menozzi ed era di un ibrido di classe 700 raccolto al 35% di s.s. La quantità di trinciato necessaria alla sperimentazione è stata prelevata una sola volta e poi congelata a -20°C.

Il **FORSU** proviene dalla raccolta differenziata domestica della città di Monza. Anche il FORSU è stato prelevato una sola volta per la quantità necessaria a tutta la sperimentazione (100 kg), macinato, omogeneizzato, suddiviso in aliquote di circa 10 kg e congelato a -20°C.

Tutti i materiali sono stati **caratterizzati** per i parametri: sostanza secca, azoto totale ed ammoniacale, pH, carbonio.

Tabella 14 – Risultati medi delle analisi caratterizzanti i materiali da ingessare

Substrato	pH	N ammoniacale (mg/kg t.q.)	N _{tot} Kjeldhal (mg/kg t.q.)	Rapporto N-NH ₄ /N _{tot} (%)	N (% ss)	C _{tot} (% ss)	C/N	ss (% t.q.)
Insilato di mais	3,95	204,43	3.939,09	5,20	1,18	44,08	37,30	30,93
FORSU	4,32	464,33	6.811,86	6,82	2,66	44,17	16,59	24,19
Inoculo	7,50	1384,15	2.065,00	66,98	2,67	34,15	12,80	2,45
Liq. suino	7,54	3115,56	4.631,10	67,30	2,44	36,97	15,18	5,85
Liq. bovino	7,64	836,22	2.141,18	39,07	2,14	39,85	18,65	6,03

Il corretto svolgimento delle fermentazioni è stato monitorato attraverso l'analisi della quantità e qualità del biogas, del rapporto acidi grassi/alcalinità e del pH. Ogni qualvolta che la quantità di biogas diminuiva, la concentrazione di metano scendeva al di sotto del 50% e il valore del rapporto acidi grassi/alcalinità scendeva al di sotto di 0,3 si procedeva all'alimentazione dei digestori con gli alimenti previsti. Le analisi della qualità del biogas venivano effettuate attraverso la valvola del singolo fermentatore con un analizzatore portatile (LGF 20). La fermentazione è durata 60 giorni. Tale limite è quello normalmente indicato per ottenere un'adeguata decomposizione dei materiali amidacei e cellulolici. Il rapporto fra liquame e biomassa era di 1:1.

Anche se i liquami potrebbero essere in gran parte digeriti in un tempo inferiore, l'uso di una durata identica per tutti i trattamenti è sembrato il più corretto, per facilitare i confronti dei risultati ottenuti.

Al termine del periodo i fermentatori sono stati aperti per il prelievo del digestato. Circa metà dello stesso è stato sottoposto a separazione solido/liquido con separatore da laboratorio (vedi capitolo NIRs).

I digestati sono stati **stoccati** in freezer a -20°C fino all'utilizzo e caratterizzati per: azoto totale, azoto ammoniacale, sostanza secca e pH.

Tabella 15 – Valori analitici dei digestati

Tipo Liquame	Matrice codigerita	Frazione	pH	Densità (g/cm ³)	N ammoniacale (mg/kg t.q.)	N _{tot} Kjeldhal (mg/kg t.q.)	Rapporto N-NH ₄ /N _{tot} (%)	N (% s.s.)	C _{tot} (% s.s.)	C/N	ss (% tq)
S	S	(tq)	7,88	1,025	2.456,41	2.927,53	83,90	2,50	34,42	13,77	1,89
S	T	(tq)	7,59	1,020	2.161,40	2.890,15	74,74	2,83	35,28	12,48	3,97
S	F	(tq)	8,01	1,025	2.938,33	3.855,83	76,26	2,68	30,32	11,32	3,71
S	S	(sl)	7,89	1,010	2.452,63	2.982,08	82,35	2,34	29,63	12,66	2,46
S	T	(sl)	7,75	1,012	2.267,22	2.555,61	88,83	2,92	33,35	11,41	2,48
S	F	(sl)	7,90	1,022	2.972,81	3.725,83	79,88	2,75	34,56	12,57	3,19
S	S	(ss)	8,81	ND	2.497,73	5.367,81	46,60	2,17	35,42	16,31	18,21
S	T	(ss)	8,58	ND	1.963,97	4.636,96	42,38	1,52	44,13	29,11	20,67
S	F	(ss)	8,60	ND	2.708,70	5.847,69	46,33	1,41	45,14	32,05	23,79
B	B	(tq)	7,51	1,021	1.338,25	2.216,67	60,61	2,52	30,46	12,07	3,52
B	T	(tq)	7,43	1,045	1.075,45	2.488,41	43,22	2,89	29,59	10,26	6,33
B	F	(tq)	7,73	1,030	2.280,63	3.697,03	62,40	2,71	30,12	11,10	5,00
B	B	(sl)	7,67	1,015	1.335,83	1.919,86	69,59	2,61	34,08	13,04	2,05
B	T	(sl)	7,66	1,016	1.728,66	1.908,31	90,65	3,20	36,22	11,33	3,02
B	F	(sl)	7,66	1,019	2.191,74	3.403,47	64,40	2,43	37,62	15,46	3,34
B	B	(ss)	8,56	ND	1.525,64	4.795,00	31,77	1,79	45,23	25,28	19,17
B	T	(ss)	8,58	ND	1.532,18	4.530,20	33,82	1,71	45,55	26,68	13,95
B	F	(ss)	8,57	ND	2.451,53	5.356,41	45,78	1,67	46,27	27,69	23,60

S = S; B = B; I = I; T = TMI; F = FORSU

(l) = liquida; (s) = solida; (tq) = tal quale; (sl) = separato liquido; (ss) = separato solido

3.1.2 Mineralizzazione in suolo

- definizione delle procedure di sperimentazione;
- allestimento della prova;
- monitoraggio della prova;
- elaborazione dei dati.

3.1.2.1 Definizione delle procedure di sperimentazione

La prova di incubazione prevedeva complessivamente 22 tesi:

- n. 6 tipi di digestati nelle loro tre frazioni (integrale, separato solido e separato liquido) (18 tesi);
- n. 2 liquami (bovino e suino);
- n. 2 controlli, uno trattato con solfato ammonico e uno con l'acqua.

I campioni contenenti acqua deionizzata sono stati utilizzati come controllo in quanto non avevano ricevuto alcun tipo di fertilizzazione mentre i campioni contenenti solfato ammonico sono stati utilizzati come riferimento per vedere le differenze di comportamento tra un fertilizzante minerale e uno organico.

La prova di incubazione è durata 70 giorni e i campionamenti sono stati effettuati nei giorni 0 – 1 – 4 – 8 – 13 – 21 – 29 – 41 – 72 dall'inizio della prova.

L'esperimento prevede anche tre date di campionamento successive a 120 – 180 – 240 i cui risultati pertanto non possono essere oggetto di questa relazione.

3.1.2.2 Allestimento della prova

Nella settimana precedente alla prova, il terreno è stato pre-incubato al buio, il volume di acqua apportato era tale che, considerando anche la successiva aggiunta di acqua tramite i liquami, non si eccedesse nel contenuto idrico di -50 kPa; questa reidratazione è stata effettuata per riattivare la biomassa microbica e permettere alla sostanza organica labile del suolo di essere mineralizzata.

Il numero delle unità sperimentali era di 792.

La prova è stata allestita con tre repliche per ogni unità sperimentale costituita da un barattolo in materiale plastico della capacità di 250 mL riempito con suolo umido corrispondente a 120 g di suolo secco. La quantità di azoto somministrato al suolo in ogni unità sperimentale è stata di 100 mg N/kg, corrispondenti a circa 460 kg N/ha (assumendo una densità apparente di 1,5 t/m³ e una profondità di incorporazione di 30 cm).

L'intera prova è stata divisa in tre sessioni, nella prima si è provveduto a preparare e fare partire la prova di mineralizzazione del digestato solido, unitamente ai due controlli (non trattato e trattato con concime chimico) la prova era costituita da 288 unità sperimentali; a distanza di una settimana è stata allestita la prova con i separati liquidi e i due liquami di origine (288 unità sperimentali); dopo una ulteriore settimana si è provveduto a preparare ed avviare la prova con gli integrali-tal quale (216 unità sperimentali).

La divisione in tre sessioni della prova è stata necessaria per via della dimensione della prova stessa, infatti non sarebbe stato possibile preparare e successivamente seguire tutta la sperimentazione in uniche date. È impossibile preparare 792 unità sperimentale in un solo giorno e nel contempo effettuare le determinazioni di 68 analisi al tempo zero e poi ad ogni data di campionamento analizzare 68 campioni. Invece, separando le prove pur rispettando il medesimo calendario per tutte, e sfalsandole fra loro di una settimana è stato possibile gestire l'intera prova.

La preparazione dei campioni di ogni singola sessione di sperimentazione è stata suddivisa in due giornate, nella prima si è provveduto a immettere il suolo nei singoli barattoli, nel secondo giorno si è provveduto ad aggiungere i digestati e si è posto ad incubare tutte le unità sperimentali; inoltre i sono effettuate le analisi delle unità sperimentali al tempo zero.

Pesata terreno: per ogni terreno sono stati pesati, in barattoli di plastica da 250 mL, 120 g di suolo secco. I pesi dei barattoli vuoti e delle pesate reali di suolo sono stati registrati.

Aggiunta materiali: ad ogni campione è stata aggiunto ciò che era previsto dallo schema sperimentale; il peso di tutte le aggiunte è stato registrato. Durante questa fase i digestati sono stati conservati in ghiaccio e sono stati analizzati all'inizio e alla fine della preparazione per valutare se vi fossero state delle perdite di ammoniaca.

Le aggiunte al terreno dei digestati e di solfato ammonico sono state effettuate in funzione dell'apporto di 100 mg N/kg; attraverso l'aggiunta dei materiali si è portato il suolo a un contenuto idrico di -50 kPa.

Miscelazione: il contenuto dei barattoli (suolo + materiale) è stato versato su fogli di *cellophan* e accuratamente miscelato con l'utilizzo di palette metalliche; al termine della miscelazione il mix è stato rimesso nei barattoli.

Pesata finale: è stata effettuata una pesata lorda (mix + barattolo) di tutti i campioni, i valori sono stati registrati.

Condizioni di incubazione: per realizzare un'incubazione con campionamenti distruttivi, è stato adottato il disegno sperimentale a nursery descritto da Thuriès et al. (2000). Durante ogni intervallo di incubazione ventiquattro unità sperimentali (8 trattamenti x 3 repliche) sono stati collocati individualmente in giare da 3 L a tenuta ermetica insieme con un baeker contenente 10 mL di NaOH 0,5 M, che agiva da trappola per la CO₂. Sei giare contenenti esclusivamente la trappola per la CO₂ sono state realizzate e utilizzate come bianchi. Gli altri campioni, che sarebbero stati analizzati nelle date successive, sono stati conservati, fino alla loro entrata nelle giare, in *nursery*. Queste erano costituite da vasche di plastica, con un sottile velo di acqua sul fondo, ricoperte da *cellophan* nero forato.

Tutta la prova è stata condotta ad una temperatura costante di circa 25°C, mantenuta grazie a un condizionatore e per tutta la durata dell'esperimento i campioni sono rimasti al buio. A intervalli regolari di circa una settimana, è stata reintegrata l'acqua persa dai campioni riportandoli al contenuto idrico iniziale di -50 kPa.

3.1.2.3 Monitoraggio della prova

Estrazioni per analisi: i campioni collocati nelle giare per l'analisi della respirazione del terreno sono stati sottoposti ad analisi distruttive alla loro uscita.

Circa 30 g di terreno sono stati utilizzati per l'estrazione dell'azoto minerale, gli estratti ottenuti e la parte di terreno non utilizzato nelle estrazioni sono stati quindi stoccati a -20°C per analisi successive.

Durante ogni intervallo di incubazione, 24 unità sperimentali (8 trattamenti x 3 repliche) sono state collocate individualmente in giare da 3 L a tenuta ermetica insieme con un becker contenente 10 mL di NaOH 0,5 M che agiva da trappola per la CO₂. Si sono preparati inoltre tre controlli costituiti da giare a chiusura ermetica con all'interno il becker contenente 10 mL di NaOH senza il barattolo contenente il suolo.

Al termine dell'intervallo di incubazione si sono aperte le giare, si è prelevato il becker contenente NaOH, aggiunto 10 mL di BaCl₂ 1,5 N e tre o quattro gocce dell'indicatore fenolftaleina. Si è titolato il contenuto del recipiente con HCl 0,1 N fino al viraggio dal colore rosa al bianco neutro.

La quantità di C-CO₂ prodotta è stata calcolata secondo la seguente equazione:

$$\text{mg C-CO}_2 \text{ g ss}^{-1} \text{ h}^{-1} = \frac{((V_0 - V) \times M \times E)}{20 \times H_{\text{inc}}} \quad (1)$$

dove:

- g ss = grammi di suolo (peso secco)
- V₀ = mL di HCl necessari per titolare NaOH del bianco (media di tutti i bianchi)
- V = mL di HCl necessari per titolare NaOH del campione
- H_{inc} = durata di incubazione espressa in ore
- M = 0,1 – Molarità dell' HCl
- E = peso equivalente del carbonio nella CO₂ (E=6 se i risultati vengono espressi in termini di C; E=22 se i risultati vengono espressi in termini di CO₂)

Le diverse forme di azoto minerale presenti nel suolo sono state estratte con soluzione di KCl. In queste condizioni, il potassio ha rimosso lo ione ammonio legato agli scambiatori del suolo, mentre la frazione azotata comprendente nitrati e nitriti è stata portata in soluzione per l'effetto dipolare dell'acqua.

Per ogni unità sperimentale sono stati pesati circa 30 g di mix, in bottiglie di plastica da 250 mL, ed è stata aggiunta una quantità di KCl 1 M pari a 100 mL. I campioni sono stati quindi sottoposti ad agitazione (50 giri min⁻¹) per 120 minuti e filtrati (filtri *Whatman # 2*).

Gli estratti sono stati congelati a -20°C ed analizzati in un secondo momento, per la determinazione dell'azoto ammoniacale e nitrico, secondo due distinti metodi colorimetrici. La determinazione dell'azoto ammoniacale è stata effettuata per colorimetria tramite analizzatore a flusso continuo FIA-Star 5000 (Metodo di riferimento Fertimont, 1986).

L'estratto di suolo è stato iniettato in una corrente trasportatrice (*carrier* di KCl), dove si è unito a un flusso di sodio idrossido. In ambiente alcalino, l'equilibrio ammonio-ammoniaca si sposta a favore di quest'ultima. L'ammoniaca difonde poi attraverso una membrana permeabile ai gas in un flusso di indicatore al blu-indofenolo. Questa corrente di indicatore comprende un mix di indicatori acido-basici, che reagiscono con l'ammoniaca. La variazione di colore risultante può essere misurata fotometricamente.

La concentrazione dell'analita viene valutata ricorrendo a un'equazione di calibrazione individuata con un *set* di standard a concentrazione nota di 0 – 0,1 – 0,5 – 1 – 2 – 5 mg L⁻¹ (equazione polinomiale di II ordine).

La determinazione dell'azoto ammoniacale è stata effettuata per colorimetria tramite analizzatore a flusso continuo (Metodo di riferimento Fertimont, 1986).

Il principio chimico della determinazione dei nitrati è la riduzione dei nitrati a nitriti in un riduttore a cadmio ramato. La reazione colorimetrica sfruttata per la determinazione dell'azoto nitrico prevede la preliminare riduzione dello stesso a azoto nitroso, per passaggio del campione attraverso una colonnina impaccata con cadmio ramato. Successivamente, l'azoto nitroso posto a contatto con la sulfanilammide ne determina la diazotazione e, ulteriormente, in presenza di n(1-naf-til)etilendiammidicloroidrato la sulfanilammide diazotata viene miscelata con questo originando un complesso colorato che assorbe la luce alla lunghezza d'onda di 525 nm. La concentrazione di N-NO₃ negli estratti è stata calcolata sulla base di una curva di calibrazione (lineare) costruita inserendo in ciascuna sessione una serie di standard a concentrazione nota di azoto (0 – 0,1 – 0,5 – 1 – 2 – 5 mg L⁻¹).

Il metodo descritto fornisce la somma dei nitriti e dei nitrati originariamente presenti nell'estratto. Comunque, la concentrazione originale dei nitriti è nella maggior parte dei casi trascurabile comparata con la concentrazione dei nitrati.

C-CO₂ respirato in percentuale del C nativo del suolo:

$$C-CO_2 \% C_{nat} (t) = \frac{C-CO_2 \text{ resp } (0-t)}{C_{nat}} \quad (2)$$

dove:

- (0-t) = intervallo di tempo 0-t
- C-CO₂ resp (0-t) = C-CO₂ respirato nell' intervallo 0-t
- C_{nat} = concentrazione di carbonio nativo nel suolo

Tassi di respirazione in percentuale del C nativo del suolo:

$$\text{Tasso } C-CO_2 \% C_{nat} (t) = \frac{C-CO_2 \text{ resp } (0-t)}{C_{nat}} \times \frac{1}{(0-t)} \quad (3)$$

C-CO₂ respirato in percentuale del C aggiunto:

$$C-CO_2 \% C_{agg} (t) = \frac{C-CO_2 \text{ resp } (0-t)}{C_{agg}} \quad (4)$$

dove:

- C_{agg} = concentrazione di carbonio aggiunto al suolo con la liquamazione

Tassi di respirazione in percentuale del C aggiunto:

$$\text{Tasso } C-CO_2 \% C_{agg} (t) = \frac{C-CO_2 \text{ resp } (0-t)}{C_{agg}} \times \frac{1}{(0-t)} \quad (5)$$

Recupero di azoto ammoniacale al tempo zero:

$$\text{Recupero di N ammoniacale } (0) = \frac{[NH_4^+] \text{ applicato}}{[NH_4^+] \text{ ritrovato}} \times 100 \quad (6)$$

Azoto minerale:

$$[N_{min}] (t) = [NH_4^+] (t) + [NO_3] (t) \quad (7)$$

dove:

- [N_{min}] (t) = concentrazione di azoto minerale al tempo t
- [NH₄⁺] (t) = concentrazione di azoto ammoniacale al tempo t
- [NO₃] (t) = concentrazione di azoto nitrico al tempo t

Concentrazioni nette di azoto ammoniacale, nitrico e minerale:

$$[N_{\min}]_{\text{netta}}(t) = [N_{\min}]_T(t) - [N_{\min}]_C(t) \quad (8)$$

$$[NH_4^+]_{\text{netta}}(t) = [NH_4^+]_T(t) - [NH_4^+]_C(t) \quad (9)$$

$$[NO_3]_{\text{netta}}(t) = [NO_3]_T(t) - [NO_3]_C(t) \quad (10)$$

dove:

- $[N_{\min}]_T(t)$ = concentrazione di azoto minerale al tempo t nel suolo trattato
- $[N_{\min}]_C(t)$ = concentrazione di azoto minerale al tempo t nel suolo di controllo

Mineralizzazione netta dell'azoto in percentuale dell'azoto totale aggiunto:

$$\text{Mineralizzazione netta} = \frac{([N_{\min}]_T(t) - [N_{\min}]_T(0)) - ([N_{\min}]_C(t) - [N_{\min}]_C(0))}{N_{\text{agg tot}}} \quad (11)$$

dove:

- $[N_{\min}]_T(0)$ = concentrazione di azoto minerale al tempo 0 nel suolo trattato
- $[N_{\min}]_C(0)$ = concentrazione di azoto minerale al tempo 0 nel suolo di controlli

Mineralizzazione netta dell'azoto in percentuale dell'azoto organico aggiunto:

$$\text{Mineralizzazione netta} = \frac{([N_{\min}]_T(t) - [N_{\min}]_T(0)) - ([N_{\min}]_C(t) - [N_{\min}]_C(0))}{N_{\text{agg organico}}} \quad (12)$$

3.1.2.4 *Elaborazione dei dati*

Al fine di valutare la significatività delle differenze tra le tesi è stata effettuata l'analisi della varianza sulle variabili dipendenti descriventi il pH del terreno, le dinamiche del carbonio (tasso di respirazione in percentuale del carbonio nativo del suolo e in percentuale del carbonio aggiunto) e dell'azoto (mineralizzazione netta in percentuale dell'azoto totale aggiunto e dell'azoto organico aggiunto).

Considerando i 792 trattamenti risultanti da un disegno sperimentale a randomizzazione completa è emerso che le loro varianze non erano omogenee (Test di Levene; $P < 0,05$).

Per condurre le analisi è stato utilizzato il software SPSS ver. 16.0.2 (SPSS Inc., 2007) con la procedura UNIANOVA per l'analisi della varianza.

3.2 Risultati

Per meglio facilitare la lettura dei risultati della prova di mineralizzazione delle varie frazioni di digestati derivati da liquami bovini e suini fermentati singolarmente e con l'aggiunta di trinciato di mais di mais o FORSU, sono state attribuite alle diverse tesi delle sigle identificative che sono mostrate nella Tabella 16, di seguito riportata.

Tabella 16 – Tabella riassuntiva delle tesi della sperimentazione e delle sigle identificative

Tipo di tesi	Composizione tesi	Codice tesi
Controllo non trattato	Suolo + acqua	C
Controllo trattato	Suolo + solfato ammonico + acqua	CSA
Liquame bovino	Suolo + liquame bovino fresco	LB
Liquame suino	Suolo + liquame suino fresco	LS
Digestato integrale di liquame bovino	Suolo + digestato integrale liquame bovino + acqua	LB-I
Digestato integrale di liquame suino	Suolo + digestato integrale liquame suino + acqua	LS-I
Digestato integrale liquame bovino + trinciato di mais	Suolo + digestato integrale di liquame bovino + trinciato di mais + acqua	LB-TM-I
Digestato integrale liquame bovino + FORSU	Suolo + digestato integrale di liquame bovino + FORSU + acqua	LB-FO-I

Tipo di tesi	Composizione tesi	Codice tesi
Digestato integrale liquame suino + trinciato di mais	Suolo + digestato integrale di liquame suino + trinciato di mais + acqua	LS-TM-I
Digestato integrale liquame suino + FORSU	Suolo + digestato integrale di liquame suino + FORSU + acqua	LS-FO-I
Digestato separato liquido di liquame bovino	Suolo + digestato separato liquido di liquame bovino + acqua	LB-L
Digestato separato liquido di liquame suino	Suolo + digestato separato liquido di liquame suino + acqua	LS-L
Digestato separato liquido liquame bovino + trinciato di mais	Suolo + digestato separato liquido di liquame bovino + trinciato di mais + acqua	LB-TM-L
Digestato separato liquido liquame bovino + FORSU	Suolo + digestato separato liquido di liquame bovino + FORSU + acqua	LB-FO-L
Digestato separato liquido liquame suino + trinciato di mais	Suolo + digestato separato liquido di liquame suino + trinciato di mais + acqua	LS-TM-L
Digestato separato liquido liquame suino + FORSU	Suolo + digestato separato liquido di liquame suino + FORSU + acqua	LS-FO-L
Digestato separato solido di liquame bovino	Suolo + digestato separato solido di liquame bovino + acqua	LB-S
Digestato separato solido di liquame suino	Suolo + digestato separato solido di liquame suino + acqua	LS-S
Digestato separato solido liquame bovino + trinciato di mais	Suolo + digestato separato solido di liquame bovino + trinciato di mais + acqua	LB-TM-S
Digestato separato solido di liquame bovino + FORSU	Suolo + digestato separato solido di liquame bovino + FORSU + acqua	LB-FO-S
Digestato separato solido di liquame suino + trinciato di mais	Suolo + digestato separato solido di liquame suino + trinciato di mais + acqua	LS-TM-S
Digestato separato solido di liquame suino + FORSU	Suolo + digestato separato solido di liquame suino + FORSU + acqua	LS-FO-S

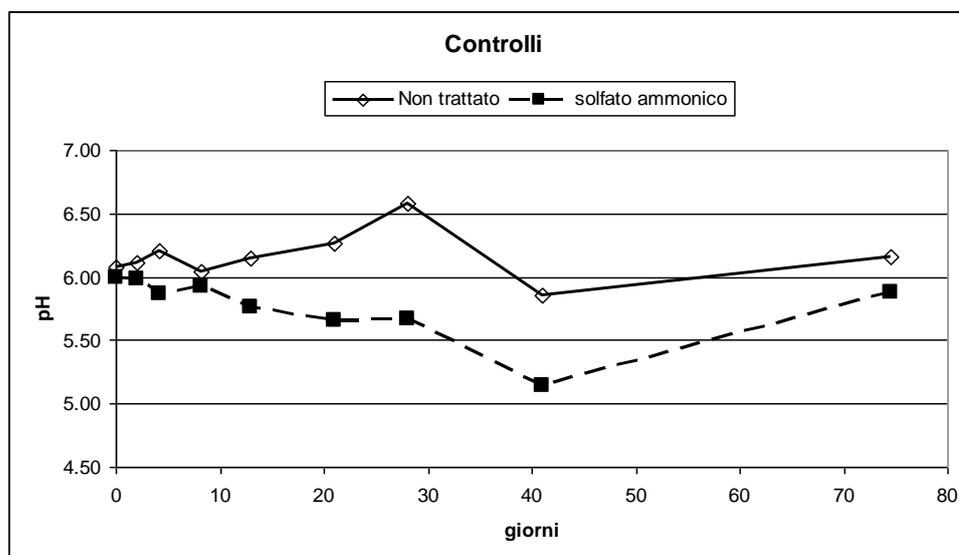
3.2.1 pH

I valori di pH sono un indice dell'attività microbica del suolo, infatti lo sviluppo dei microrganismi e la mineralizzazione del carbonio porta a una diminuzione di tali valori.

I digestati distribuiti al terreno hanno una notevole dotazione in ammonio che aumenta il pH ed è suscettibile di volatilizzazione in condizioni basiche (pH 8,0).

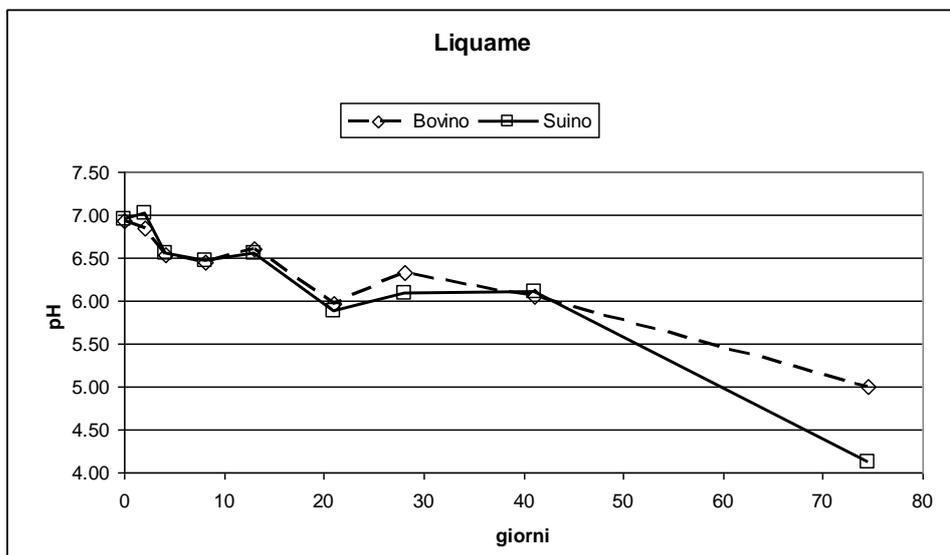
I valori del campione di controllo rappresentano un riferimento di fondo dell'attività del suolo ("rumore di fondo"). Il campione di controllo trattato con solfato ammonico tende ad acidificare il terreno (Figura 13)

Figura 13 – Andamento nel tempo dei valori di pH nei terreni utilizzati come controllo



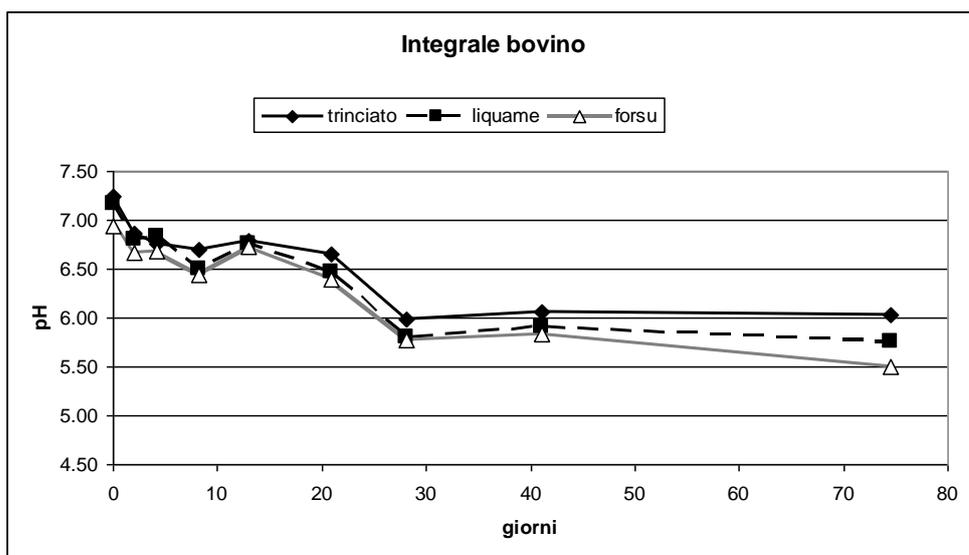
L'andamento dei valori di pH nel tempo dei campioni in mineralizzazione relativi ai liquami suini e bovini non fermentati evidenzia una netta tendenza all'acidificazione dell'ambiente; la discesa della curva dei valori di pH del suolo nel tempo è netta, con valori di partenza di pH 7,0 e con due tratti di plateau a pH 6,5 tra il 5° e il 15° e tra il 20° e 40° giorno. Dopo il 40° giorno i valori ricominciano a diminuire raggiungendo pH 5,0 per il bovino e pH 4,2 per il suino (Figura 14). Ciò è da attribuire alla forte attività microbica.

Figura 14 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei terreni trattati con liquami di bovini e suini non fermentati



L'andamento delle curve dei valori di pH della mineralizzazione dei differenti tipi di digestati integrali LB-I, LB-TM-I e LB-FO-I, hanno andamento simile tra loro (Figura 14). I valori di partenza sono prossimi pH 7,0 (pH 7,2 LB-I, LB-TM-I ; pH 6,8 LB-FO-I). Diminuiscono poi dall'inizio della prova lentamente, ma con costanza pur con una fase di stasi a pH 6,6 – 6,7, tra il 20° e 30° giorno; la curva poi riprende a scendere fino a stabilizzarsi, alla fine della prova, a pH 6,00 per il solo LB-I e LB-TM-I, mentre invece LB-FO-I mostra una diminuzione lenta fino al valore di pH 5,5.

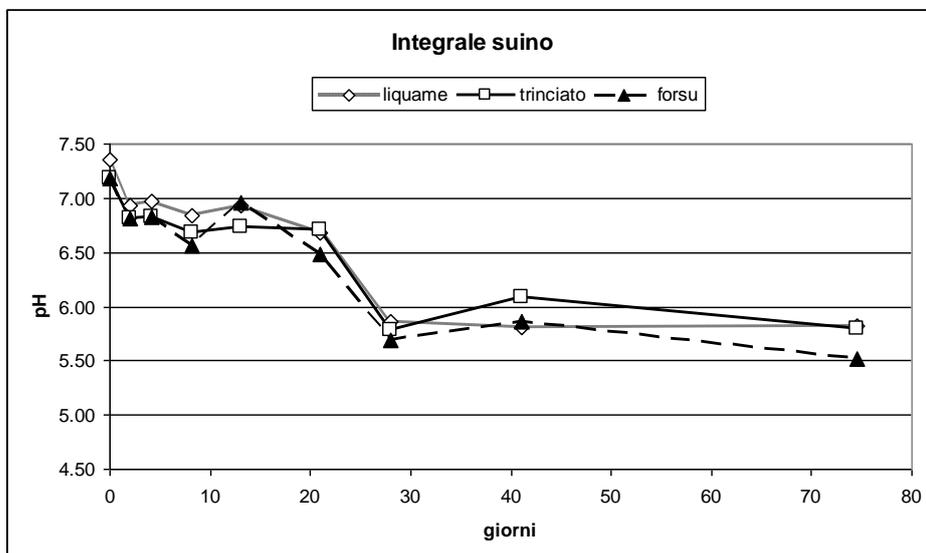
Figura 15 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei digestati integrali di liquame bovino (LB-I), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-I), liquame bovino + FORSU (LB-FO-I)



L'andamento nel tempo delle curve dei valori di pH nel corso della mineralizzazione nel terreno del digestato integrale derivato dal liquame suino (Figura 16), equivale a quello già visto per i liquami bovini. Anche in questo caso i valori di

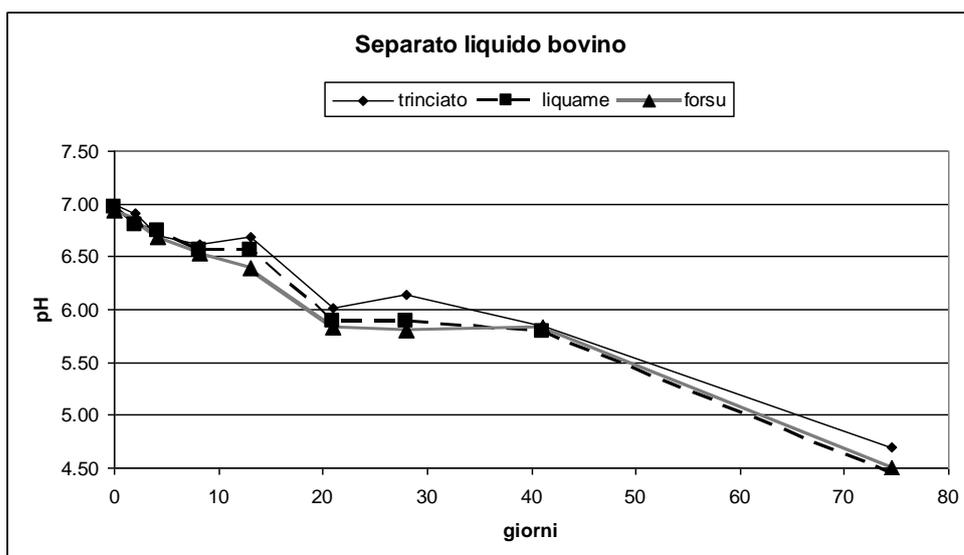
partenza dei tre digestati si attestano tra pH 7,0 e 7,5 mostrando poi un graduale decremento dei valori fino al 20° giorno della sperimentazione dove i terreni con LS-I, LS-TM-I si stabilizzano intorno a pH 5,7; mentre il digestato di LS-FO-I si è stabilizzato su valori più ridotti di pH 5,5.

Figura 16 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei digestati integrali di liquame suino (LS-I), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-I), liquame suino + FORSU (LS-FO-I)



L'andamento delle curve nel tempo delle prove di mineralizzazione dei separati liquidi derivati dal liquame bovino (Figura 17), mostrano la consueta tendenza alla diminuzione con un fase di rallentamento nel periodo centrale delle prove (tra il 20° e il 30° giorno dall'inizio della sperimentazione) su valori di pH prossimi al 6,0; successivamente la diminuzione riprende, per arrivare a termine della sperimentazione a valori di pH 4,5 (liquame e liquame + FORSU) e 4,7 per LB-TM-L.

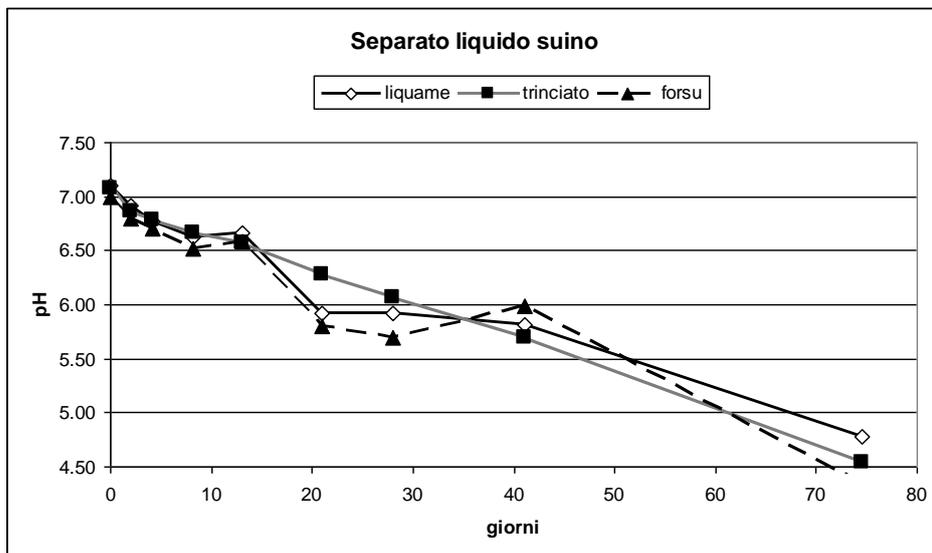
Figura 17 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei separati liquidi dei digestati di liquame bovino (LB-L), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-L), liquame bovino + FORSU (LB-FO-L)



Anche le curve di andamento dei valori di pH dei suoli trattati con separato liquido di digestati originati dal liquame suino (Figura 18) LS-L, LS-TM-I e LS-FO-L, non differiscono significativamente da quelle del separato liquido del digestato originato dal liquame bovino. I valori di pH ad inizio della prova sono molto prossimi a pH 7,0 per tutte le tesi, nei

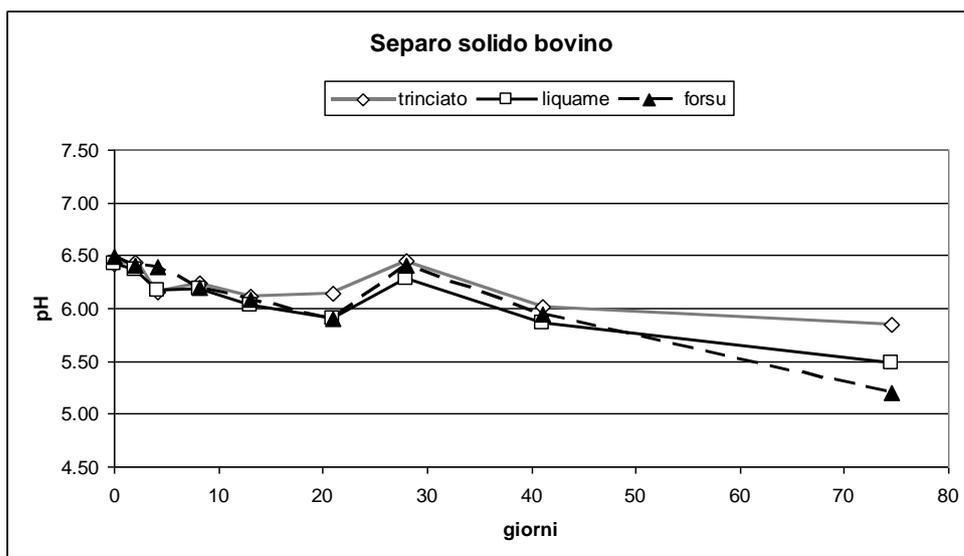
giorni a seguire il decremento di valori è moderato, ma costante con una stasi tra il 20° e 30° giorno, successivamente i trend decrescente riprende, fino ad arrivare a valori compresi tra pH 4,7 e 4,5.

Figura 18 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei separati liquidi dei digestati di liquame suino (LS-L), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-L), liquame suino + FORSU (LS-FO-L)



Le curve relative all'andamento dei valori di pH dei suoli trattati con la frazione solida del separato dei digestati derivati del liquame bovino, mostrano andamenti simili tra loro, con valori di partenza di pH 6,5 per tutte le tesi (Figura 19) Anche in questo caso nei primi 20 giorni si osservano valori in diminuzione fino a pH 6,0, ma in questo caso seguiti da un rapido incremento dei valori di pH di tutti i materiali, che raggiunge al 30° giorno il valore di 6,4; successivamente diminuiscono ancora e al 40° giorno si attestano su valori di pH 6,0. Alla fine della prova si verifica ancora una riduzione modesta a pH 5,9. Le curve dei valori di pH dei terreni delle frazioni solide dei separati prodotti dalla fermentazione del solo LB-S, LB-FO-S continuano a diminuire attestandosi a fine prova su valori rispettivamente di pH 5,5 e 5,1.

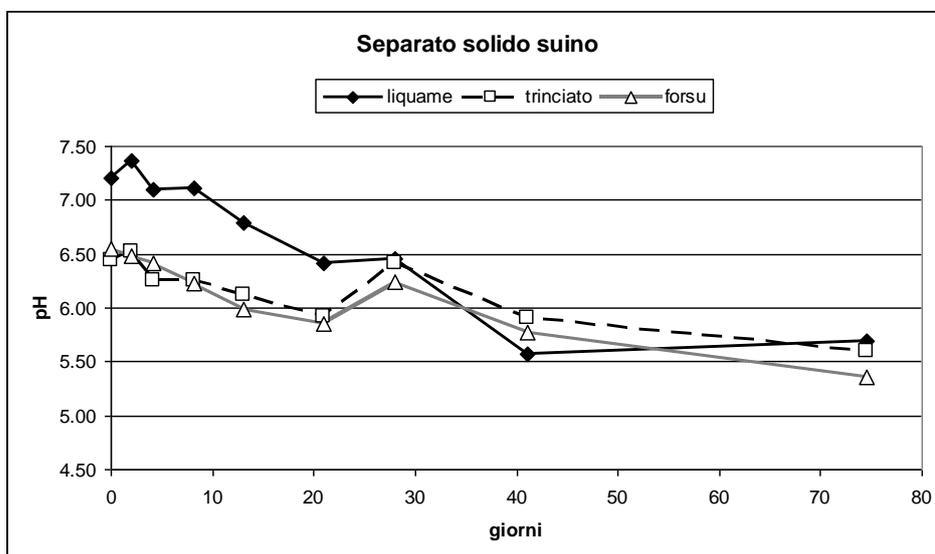
Figura 19 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei separati solidi dei digestati di liquame bovino (LB-S), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-S), liquame bovino + FORSU (LB-FO-S)



Le curve dei valori di pH del suolo delle prove di mineralizzazione dei separati solidi di digestati aventi come origine il liquame suino (Figura 20), presentano andamenti differenziati. I suoli trattati con digestato di solo liquame suino hanno un valore di partenza di pH 7,1. Nei primi giorni della prova si osserva un aumento fino a pH 7,4, poi comincia a di-

minuire fino a valori di pH 6,5 al 30° giorno; dopo si osservano curve simili a quelle degli altri materiali, mentre successivamente segue l'andamento crescente nel tempo e nei valori. I valori dei suoli trattati con LS-FO-S e LS-TM-S invece hanno andamenti simili tra loro. Il valore di partenza è di pH 6,5, i valori scendono fino al 20° giorno a pH 6,0 per poi stabilizzarsi intorno a pH 6,2 – 6,3 al 30° giorno e infine scendere fino a pH 5,5.

Figura 20 – Andamento nel tempo dei valori di pH dei separati solidi dei digestati di liquame suino (LS-S), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-S), liquame suino + FORSU (LS-FO-S)



Pertanto relativamente al pH i suoli trattati con i liquami non fermentati e con le varie frazioni di digestato nelle diverse combinazioni, mostrano valori di partenza intorno alla neutralità e successivi rapidi decrementi tali da impedire la volatilizzazione, durante la prova, dell'ammoniaca; inoltre dimostrano un aumento dapprima molto forte dell'attività microbica, poi un rallentamento della stessa dopo circa un mese, e infine una ripresa della stessa fino a giungere ad una stabilizzazione mostrata da un pH particolarmente basso.

Tale andamento evidenzia anche il susseguirsi delle generazioni delle popolazioni microbiche, che prima aumentano in individui e in specie e successivamente si stabilizzano, producendo un seconda generazione che nuovamente si sviluppa per poi portare ad un popolazione stabile.

Naturalmente l'attività e l'incremento della popolazione microbica avviene a spese della sostanza organica apportata con l'aggiunta al suolo dei digestati o dei liquami tal quali.

La forte similitudine delle curve per andamento e valori dei diversi materiali raggruppati per liquame di origine e tipo di separazione, evidenziano come la fermentazione prima e le modalità di separazione (separato solido e separato liquido) poi renda molto simili tra loro l'andamento delle curve del pH.

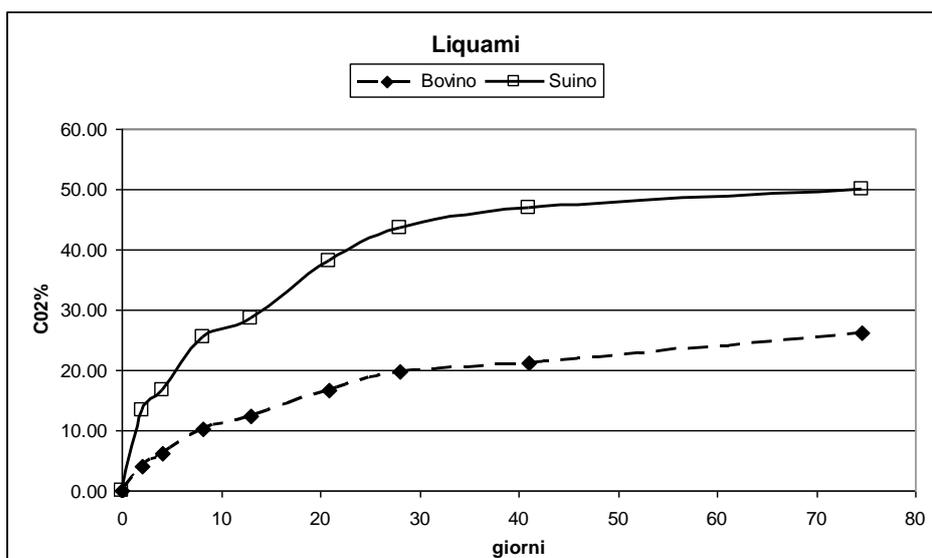
3.2.2 Respirazione

È un indice diretto della mineralizzazione della sostanza organica attraverso la flora microbica presente nel suolo che la demolisce attraverso la respirazione, in presenza di ossigeno, (respirazione intesa in senso biochimico) producendo anidride carbonica e liberando la quota dei minerali in essa contenuta. In particolare il carbonio della sostanza organica respirato viene espresso con una curva cumulata della CO₂ prodotta giornalmente espressa in percentuale sul carbonio aggiunto al suolo.

Il valore puntuale delle curva rappresenta la CO₂ prodotta dall'inizio della prova fino al punto oggetto di osservazione. I dati sono espressi al netto della respirazione basale e cioè di quella che si è verificata nei suoli di controllo.

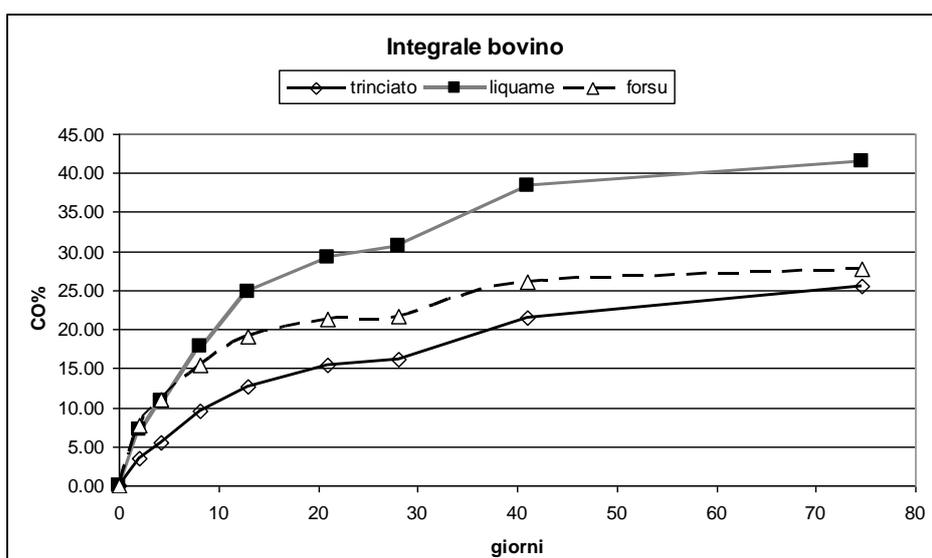
Le curve cumulate della produzione di anidride carbonica durante la mineralizzazione nel suolo trattato con liquami bovini o suini non fermentati, mostrano cinetiche differenti per tipologia di materiale (Figura 21). La respirazione del suolo indotta dal liquame suino ha un incremento molto più rapido rispetto al liquame bovino. Al 40° giorno le due curve raggiungono il *plateau* ovvero non è più disponibile per questo processo la sostanza organica introdotta. Il campione trattato con liquame suino raggiunge, a fine sperimentazione, la mineralizzazione del 50% del carbonio aggiunto, mentre il campione con liquame bovino raggiunge il 25%.

Figura 21 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei liquami non fermentati



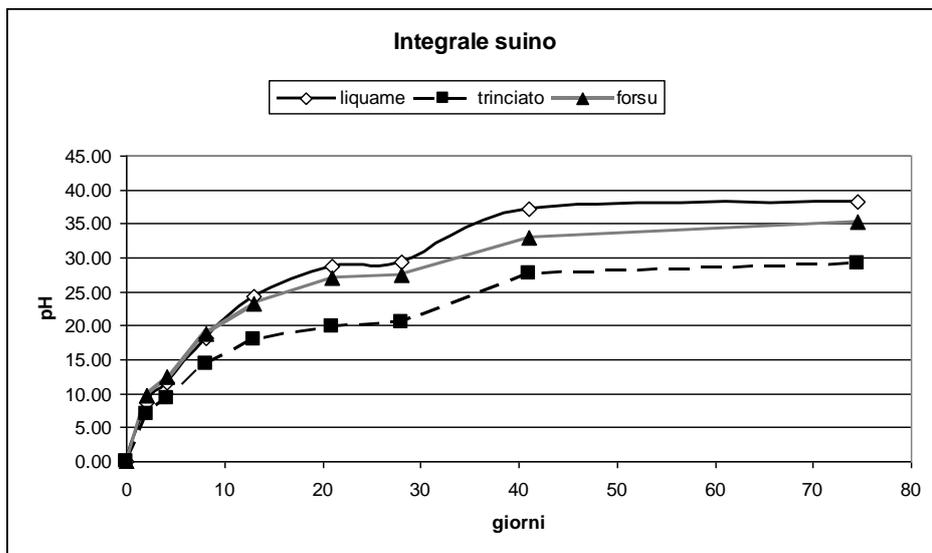
L'andamento delle curve cumulate di respirazione dei **digestati integrali** prodotti a partire dal liquame bovino presentano il medesimo andamento nel tempo, ma differiscono nei valori, il liquame fermentato mostra tassi di respirazione più importanti fino a raggiungere il 40% del carbonio aggiunto al terreno. Il valori di mineralizzazione del digestato integrale di liquame bovino mescolato con trinciato di mais (LB-TM-I) mostra i valori più bassi, raggiungendo a fine prova il 25%. La curva del digestato di digestato integrale di liquame bovino mescolato con FORSU (LB-FO-I) invece, presenta valori intermedi fra quelle del liquame fermentato e del trinciato di mais, raggiungendo a fine sperimentazione un valore simile al precedente (27%).

Figura 22 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei digestati integrali di liquame bovino (LB-I), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-I), liquame bovino + FORSU (LB-FO-I).



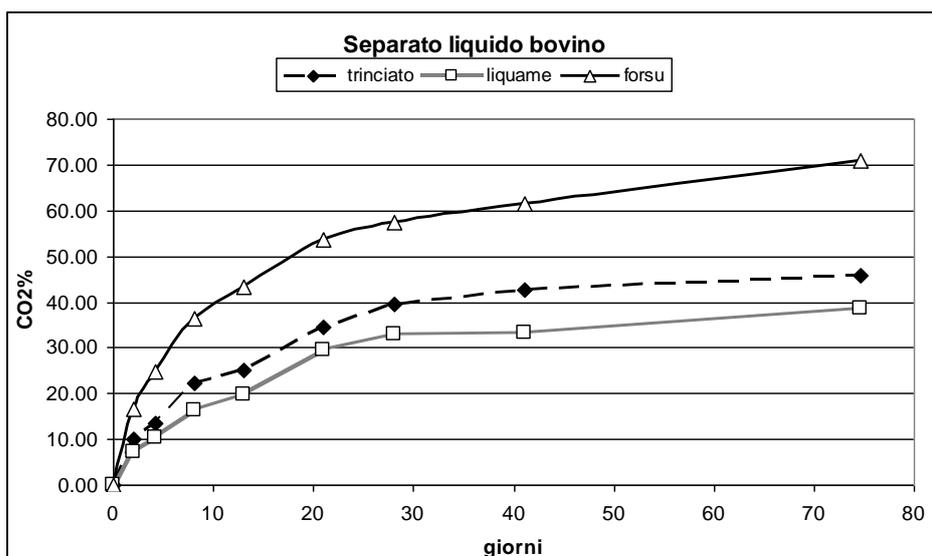
L'andamento delle curve cumulate della respirazione dovuta alla mineralizzazione nel suolo trattato con l'integrale suino (Figura 23) è simile a quello osservato per l'integrale bovino (Figura 22). Il digestato integrale di liquame suino (LS-I) mostra i valori più alti di respirazione raggiungendo il valore finale del 39%, mentre il trinciato di mais mostra valori più bassi raggiungendo a fine sperimentazione il 30%, la curva del digestato integrale di liquame suino mescolato con FORSU (LS-FO-I) è caratterizzata da valori intermedi raggiungendo a fine sperimentazione il 35%. L'andamento generale delle curve è molto simile tra loro.

Figura 23 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei digestati integrali di liquame suino (LS-I), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-I), liquame suino + FORSU (LS-FO-I).



Le curve cumulate di respirazione della mineralizzazione nel suolo della **frazione liquida del digestato** dopo separazione, indicano come questa sia maggiormente suscettibile ad esser respirata. Ciò si osserva anche per la respirazione del digestato da FORSU che raggiunge il valore finale del 70%. Detta curva non mostra un *plateau* evidente, ma al 21° giorno l'andamento della crescita della respirazione diminuisce in maniera significativa (Figura 24). La curva cumulata del separato liquido del digestato bovino mescolato con trinciato di mais (LB-TM-L) mostra valori finali di respirazione del carbonio aggiunto del 45%, il *plateau* viene raggiunto circa al 25° giorno. La curva del separato liquido del digestato di solo liquame (LB-L) è caratterizzata da un andamento molto simile alla precedente e da un valore finale del 40%. Il *plateau* viene raggiunto al 25° giorno.

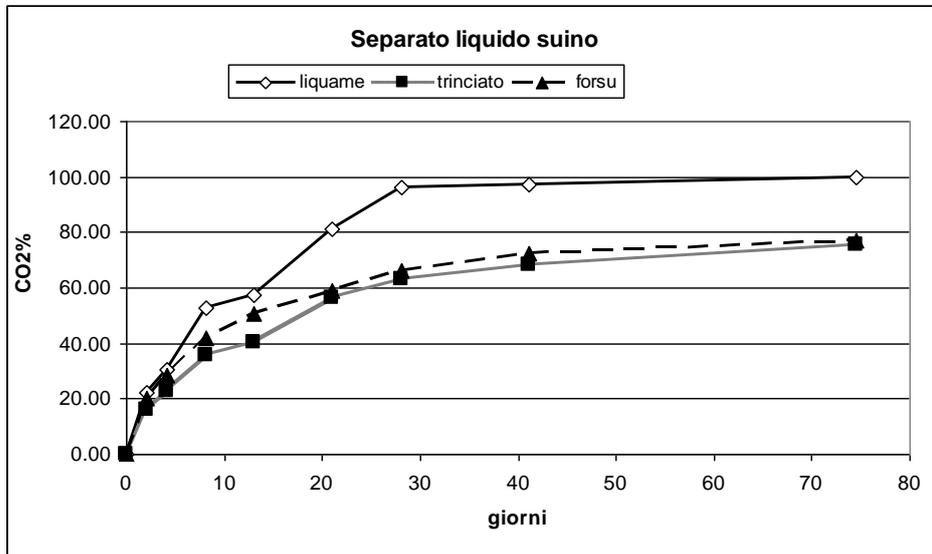
Figura 24 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei separati liquidi di digestati di liquame bovino (LB-L), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-L), liquame bovino + FORSU (LB-FO-L)



Le curve cumulate relative alla respirazione della frazione liquida del digestato separato originato dal liquame suino presentano il più alto tasso di respirazione raggiungendo il 97% del carbonio aggiunto. Il *plateau* viene raggiunto al 25° giorno. L'andamento e i valori delle curve di respirazione dei materiali prodotti dalle frazioni liquide di digestato di li-

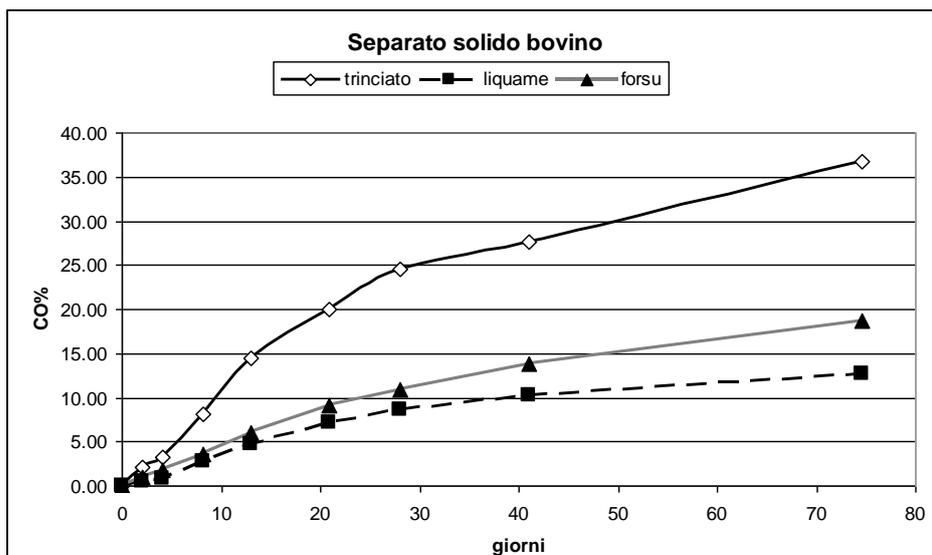
quame suino mescolato a FORSU (LS-FO-L) e mescolato a trinciato di mais (LS-TM-L) sono molto simili tra loro. Le due curve raggiungono il medesimo valore finale del 75% e il *plateau* viene raggiunto al 25° giorno.

Figura 25 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto carbonio aggiunto al suolo dei separati liquidi di digestati di liquame suino (LS-L), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-L), liquame suino + FORSU (LS-FO-L).



Le curve della respirazione del **separato solido** relative al digestato originato dal liquame bovino, mostrano andamenti di crescita meno spinti dei precedenti, così anche i valori finali, non c'è evidenza di *plateau*, ma si osservano tratti di forte diminuzione della crescita della produzione di anidride carbonica al 25° giorno circa. I valori finali sono del 35% per il separato solido del cofermentato del trinciato di mais, del 17% per il cofermentato del FORSU e del 12% del liquame bovino fermentato.

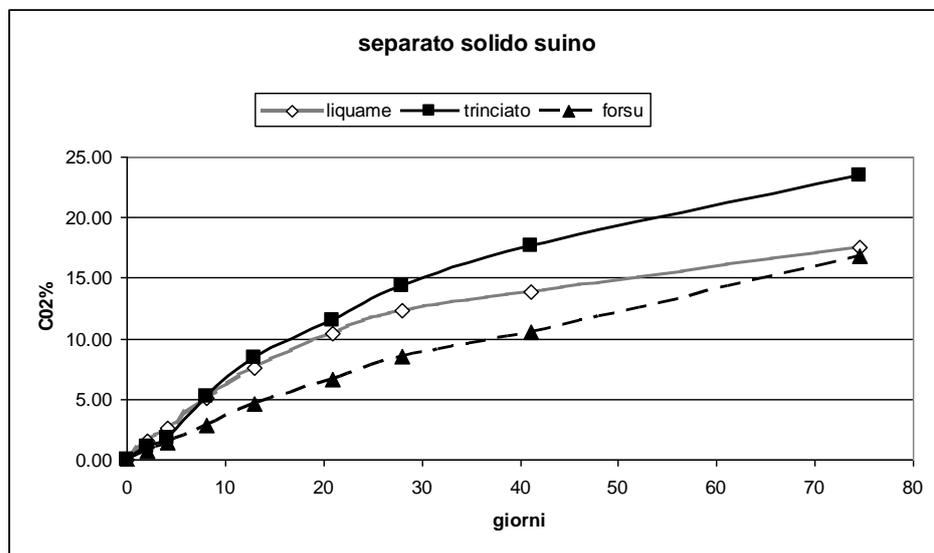
Figura 26 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei separati solidi di digestati di liquame bovino (LB-S), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-S), liquame bovino + FORSU (LB-FO-S).



Le curve cumulate della frazione separata solida dei digestati derivati dal liquame suino mostrano anche in questo caso la mancanza evidente di *plateau*, il punto di flessione dell'andamento della crescita della respirazione si raggiunge intorno al 30° giorno per tutte le curve (Figura 27). I valori finali sono simili a quelli osservati nel Figura 26 con la respi-

razione del 22% del carbonio totale aggiunto per la frazione solida del digestato di liquame bovino con trinciato di mais, del 17% per il cofermentato del FORSU e del liquame suino fermentato.

Figura 27 – Curve cumulate della produzione di anidride carbonica rispetto al carbonio aggiunto al suolo dei separati solidi di digestati di liquame suino (LS-S), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-S), liquame suino + FORSU (LS-FO-S).



I dati di respirazione evidenziano come le varie frazioni del digestato e i liquami sono suscettibili ad essere mineralizzati. Si osserva come i materiali che mostrano un più alto tasso di mineralizzazione del carbonio sono i separati liquidi. Infatti tali materiali sono poco dotati in fibre grossolane e molto ricchi in sostanza organica derivante dai corpi microbici. I dati di respirazione relativi alla mineralizzazione dei separati solidi invece mostrano come tali materiali siano costituiti da sostanza organica non così facilmente attaccabile dalla microflora e che quindi hanno un maggiore potere ammendante del suolo in quanto portatori di sostanza organica "recalcitrante".

3.2.3 Azoto disponibile per le piante (Plant Available Nitrogen – PAN)

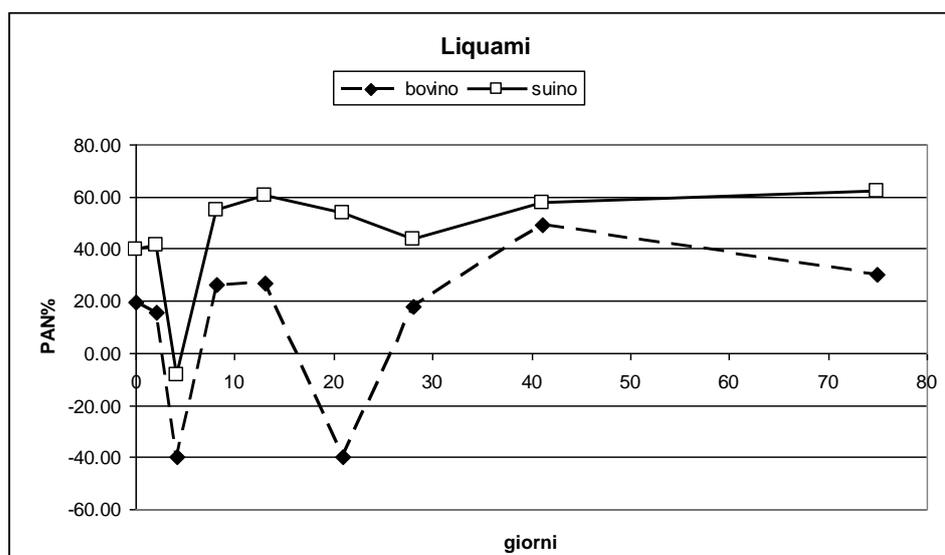
Il parametro PAN (*Plant Available Nitrogen*) indica la frazione di azoto potenzialmente disponibile per le piante e viene calcolato come rapporto tra l'azoto minerale (ammoniacale + nitrico) e l'azoto totale aggiunto al suolo.

La curva presenta valori positivi e valori negativi. I primi rappresentano la quota di azoto disponibile alle piante rispetto all'azoto aggiunto, i secondi la quota di azoto aggiunto immobilizzato nella biomassa microbica o nei colloidali del suolo e quindi non prontamente disponibile.

Le curve relative alla disponibilità di azoto nel tempo durante la mineralizzazione nel suolo dei due **liquami** non fermentati sono espone nella Figura 28; hanno un andamento differente ma paragonabile.

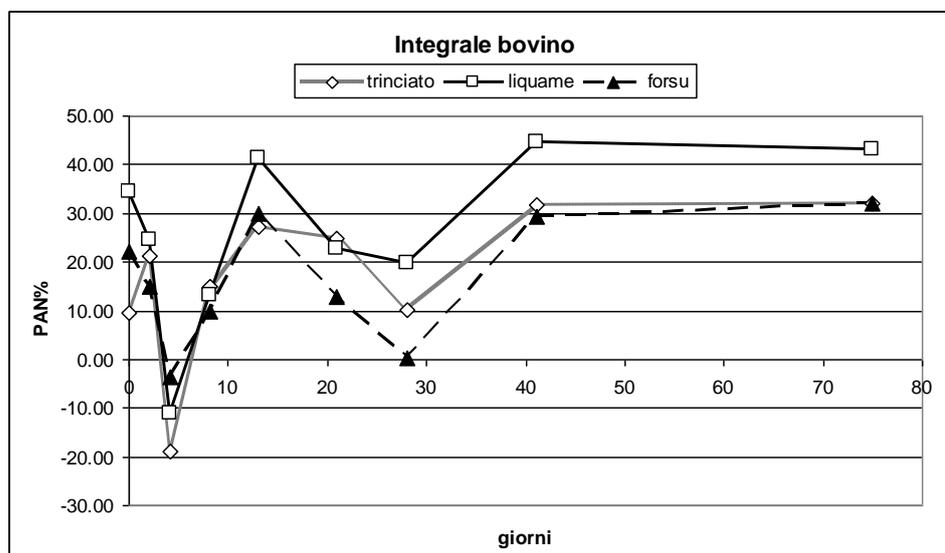
Differiscono nei valori di partenza: 40% per il suino e 20% per il bovino. Ciò è dovuto alla differente quantità di ammoniaca dei due materiali. Nei giorni successivi all'aggiunta del liquame al suolo la quota di azoto minerale disponibile diminuisce rapidamente per entrambi gli effluenti, infatti si nota una immobilizzazione al 5° giorno del 10% dell'azoto totale nel caso del liquame bovino e del 40% nel caso del liquame suino. Successivamente, nelle due tesi, la quota di azoto disponibile cresce fino a superare i valori iniziali di azoto disponibile; con il liquame bovino si raggiunge il 25%, mentre con quello suino il 60%. Successivamente le curve mostrano una diminuzione dell'azoto disponibile, che nel caso del liquame suino si risolve in una semplice flessione. Nel caso del liquame bovino si osserva un'immobilizzazione consistente intorno al 40%. Le curve riprendono a crescere arrivando a valori finali di quota di azoto disponibile del 60% per il liquame suino e del 30% per il liquame bovino.

Figura 28 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei liquami bovino e suino non fermentati.



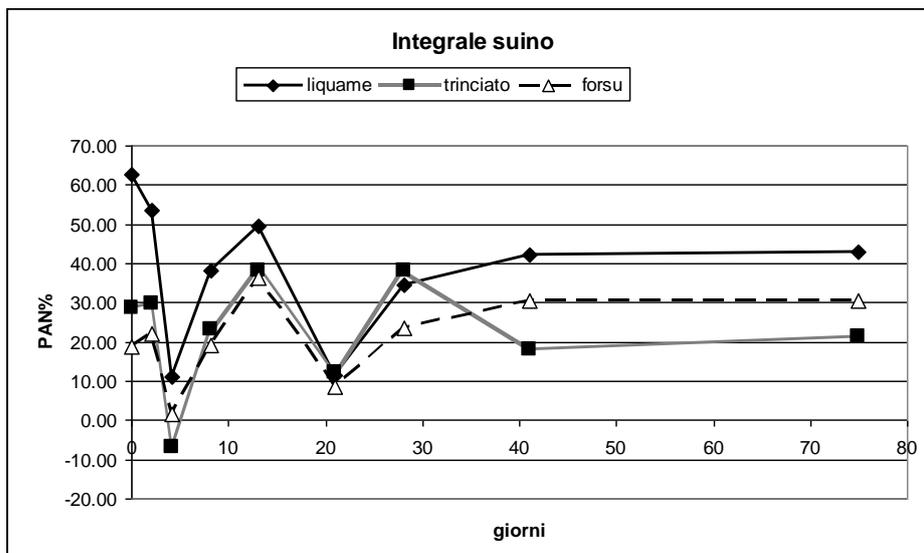
Le curve della disponibilità dell'azoto nelle prove di mineralizzazione nel suolo dei **digestati integrali** derivati dal liquame bovino, presentano un andamento simile. Infatti come nel caso dei liquami non fermentati, nelle prime fasi della mineralizzazione si osserva un marcata immobilizzazione dell'azoto (Figura 29), successivamente si verifica un aumento della disponibilità che raggiunge al 15° giorno il 40% per liquame bovino fermentato e il 30% per il cofermentato con trinciato di mais e per il cofermentato con FORSU. Dopo un ulteriore calo della disponibilità dell'azoto i valori crescono e si assestano raggiungendo il *plateau* della curva al 40° giorno.

Figura 29 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei digestati integrali di liquame bovino (LB-I), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-I), liquame + FORSU (LB-FO-I).



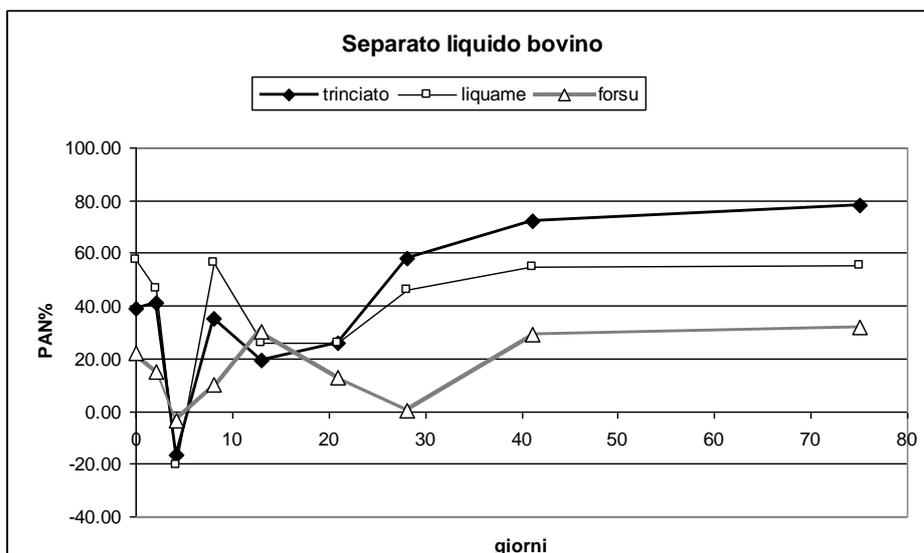
Nel Figura 30 vengono rappresentate le curve della disponibilità di azoto del digestato integrale derivato dal liquame suino. Queste ricalcano l'andamento osservato in precedenza con una rapida immobilizzazione iniziale, che in questo caso non raggiunge valori negativi. Successivamente si osserva un'altrettanto rapida mineralizzazione e messa a disposizione dell'azoto minerale nel suolo. Al 40° giorno le curve raggiungono il *plateau* con valori del 42% per il digestato integrale suino, del 30% per il cofermentato con FORSU e del 20% per il cofermentato con trinciato di mais

Figura 30 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei digestati integrali di liquame suino (LS-I), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-I), liquame suino + FORSU (LS-FO-I).



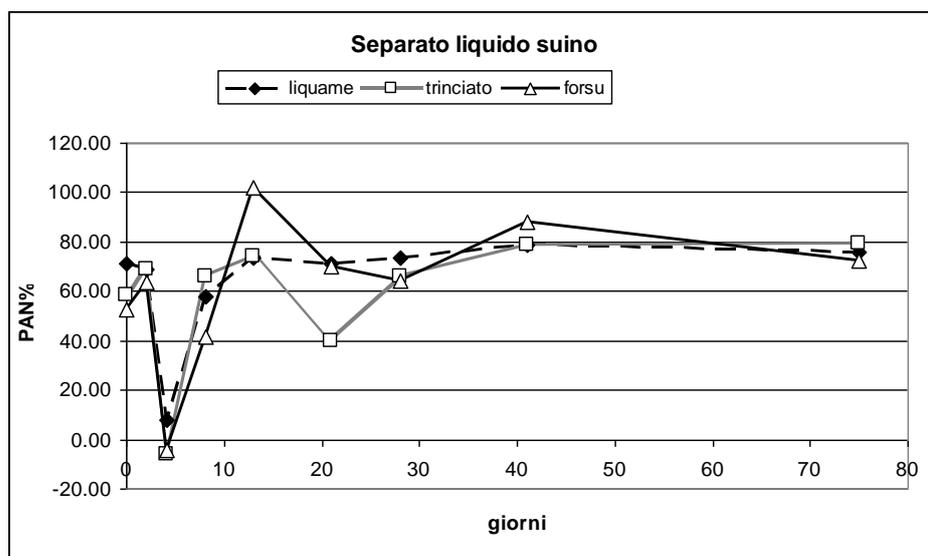
Le curve della disponibilità di azoto durante la mineralizzazione delle **frazioni liquide dei digestati** derivati da liquame bovino (Figura 31), mostrano un andamento simile a quello visto prima con un rapida diminuzione della disponibilità di azoto, che diventa negativa al 5° giorno, con valori di -20% per il digestato cofermentato con FORSU e per quello con trinciato di mais, mentre il liquame fermentato raggiunge valori di -5%; positivo invece successivamente, ma altalenante fino al raggiungimento del *plateau* che si verifica al 40° giorno, quando i valori si assestano al 75% per il cofermentato con trinciato di mais, al 45% per il liquame bovino e al 25% per il cofermentato con FORSU.

Figura 31 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei separati liquidi di digestati integrali di liquame bovino (LB-L), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-L), liquame bovino + FORSU (LB-FO-L).



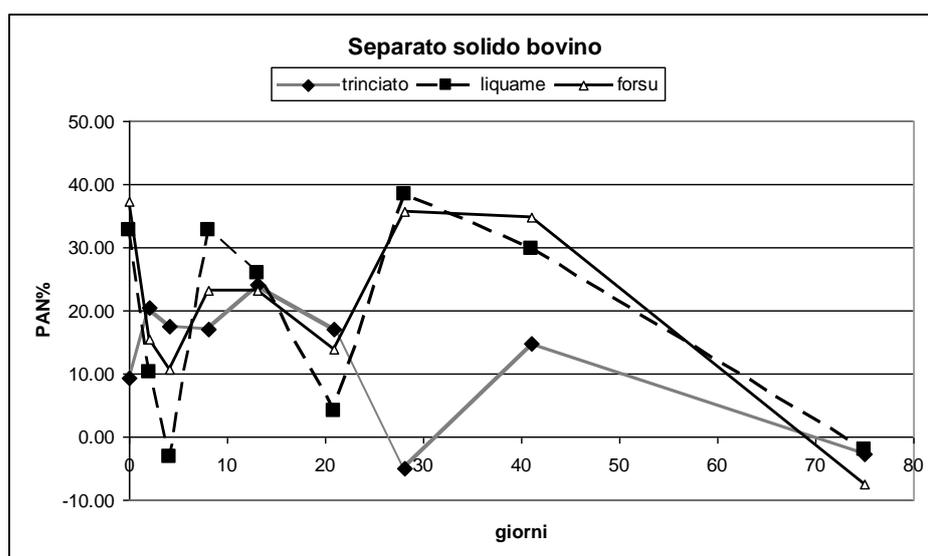
L'andamento delle curve di disponibilità di azoto durante le prove di mineralizzazione della frazione liquida dei digestati derivati dal liquame suino (Figura 32), mostrano, anche in questo caso un andamento con rapido decremento della disponibilità di azoto, senza però portare a valori negativi, successivamente i valori di disponibilità crescono in maniera non uniforme fino al raggiungimento del *plateau* della curva al 40° giorno. I valori finali dell'azoto disponibile convergono intorno all'80%.

Figura 32 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei separati liquidi di digestati di liquame suino (LS-L), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-L), liquame suino + FORSU (LS-FO-L).



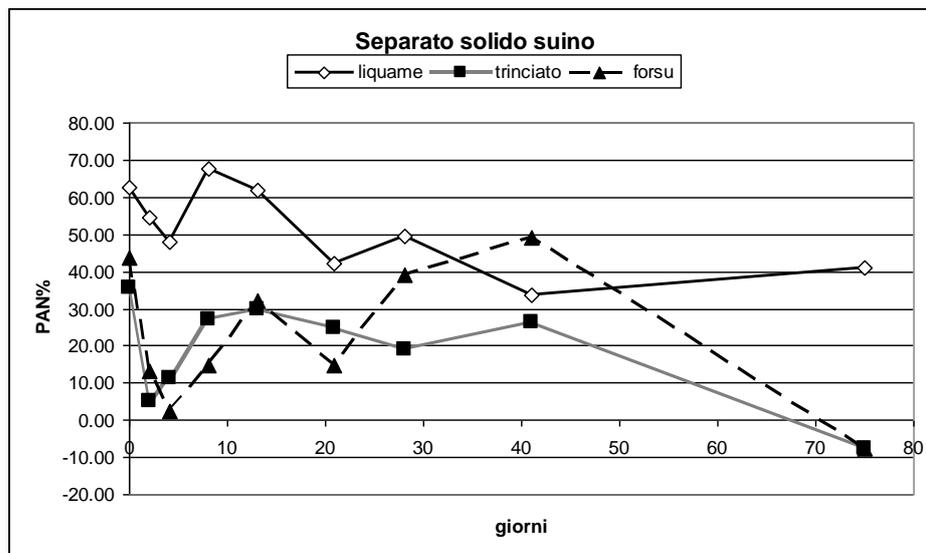
Le curve della disponibilità di azoto durante la mineralizzazione delle **frazioni solide dei digestati** separati derivati da liquame bovino (Figura 33), mostrano andamenti molto più complessi delle precedenti con andamenti della disponibilità dell'azoto in diminuzione, seguiti da rapidi incrementi; questo andamento altalenante per detti materiali si ritrova più volte nel corso della prova. L'andamento del tratto iniziale delle curve mostra, comunque, un comportamento coerente con quello osservato in precedenza, ovvero una rapida diminuzione della disponibilità di azoto anche senza raggiungere valori negativi. Non si osservano *plateau* e i valori finali della curva sono negativi seppur con valori superiori a -10%.

Figura 33 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei separati solidi di digestati di liquame bovino (LB-S), liquame bovino + trinciato di mais (LB-TM-S), liquame + FORSU (LB-FO-S).



Anche le curve relative alla disponibilità dell'azoto durante la mineralizzazione della frazione solida del digestato a base di liquame suino (Figura 34) presentano un andamento complesso fatta eccezione per quella del liquame fermentato che presenta un punto di *plateau* e valori finali ampiamente positivi pari al 40%. Le curve relative ai digestati di cofermentato con FORSU e con trinciato di mais, hanno andamento del tutto simile a quelli osservati per i digestati derivati dal liquame bovino.

Figura 34 – Curve della disponibilità nel tempo di azoto per la pianta durante la mineralizzazione in suolo dei separati solidi di digestati di liquame suino (LS-S), liquame suino + trinciato di mais (LS-TM-S), liquame suino + FORSU (LS-FO-S).



Le curve della disponibilità di azoto per le piante dei i digestati e dei liquami sono raggruppabili per tipologia di frazione (separato solido, separato liquido, digestato tal quale) e origine (liquame bovino e liquame suino).

L'immobilizzazione dell'azoto durante le prove è riconducibile a fissazione nella biomassa microbica. Infatti il rapido decremento della disponibilità di azoto nelle fasi iniziali della prova di mineralizzazione sono coerenti con i forti aumenti di produzione di anidride carbonica rilevata dai test di respirazione.

La forte crescita della biomassa, dunque, porta all'incremento della biomassa microbica costituita da materiale proteico che vien sintetizzato utilizzando e immobilizzando l'azoto presente nel suolo e in gran parte fornito con il materiale organico. Tale crescita è conseguenza e causa di un aumento di respirazione dovuto al crescente fabbisogno di energia e all'aumento del numero della biomassa microbica.

3.3 Conclusioni

- 1) La microflora presente nel suolo mineralizza la sostanza organica utilizzandola come fonte di carbonio e azoto, per sintetizzare nuova biomassa microbica e riprodursi, e come fonte di energia.
- 2) Nel primo caso la sostanza organica viene demolita in costituenti della biomassa stessa per potere sintetizzare altra sotto diversa forma, ovvero nuova biomassa microbica.
- 3) Nel secondo caso si ha una, mineralizzazione vera e propria cioè la demolizione completa della sostanza organica fino ad anidride carbonica, acqua e sali minerali. Questi ultimi in questo modo vengono messi a disposizione delle piante.
- 4) Il suolo ha ricevuto, con l'aggiunta dei digestati e degli altri effluenti, una notevole dose di azoto e carbonio. Ciò ha stimolare la microflora a crescere. Infatti tutti i dati dei parametri valutati evidenziano una forte attività microbica nelle prime fasi della mineralizzazione, con conseguente aumento della respirazione e incremento della produzione di anidride carbonica; nel contempo la sintesi di nuova microflora ha portato al momentaneo sequestro delle forme di azoto più disponibili. In campo e in presenza della coltura ciò significherebbe una momentanea indisponibilità dell'elemento per la stessa.
- 5) La frazione di digestati o i liquami maggiormente dotati di forme di azoto minerali (ammonio), hanno una quota propria di azoto più prontamente disponibile.
- 6) La frazione liquida dei digestati ha una cinetica di mineralizzazione più favorevole in quanto è maggiormente dotata di carbonio labile che viene mineralizzato facilmente, liberando, in tempi piuttosto brevi, l'azoto. La frazione liquida dei digestati è anche maggiormente dotata di azoto minerale (ammonio) che può raggiungere anche il 90% dell'azoto totale espresso sul t.q.. Questo azoto è prontamente disponibile per una coltura qualora il digestato venisse distribuito in copertura.

- 7) Per quanto riguarda la natura chimica, la fermentazione favorisce la trasformazione di una parte dell'azoto organico in ammoniaca, mentre la restante quota di azoto presente nei digestati è attribuibile alla biomassa microbica. La separazione solido-liquido allontana il materiale non demolito durante la fermentazione, parte dell'azoto organico e ammoniacale resta legato alla frazione solida, mentre l'ammoniaca, la biomassa microbica e la sostanza organica solubile di più piccola granulometria, rimane nella frazione liquida. Questi ultimi composti sono maggiormente suscettibili ad essere mineralizzati nel suolo, per via della loro natura chimica, elevata quantità di carbonio labile, e per le loro dimensioni che offrono maggiore superficie di attacco agli enzimi.
- 8) I materiali solidi ottenuti dalla separazione dei digestati, sono invece molto dotati di materiale fibroso non digerito, unitamente ad una discreta dose di ammonio. Bisogna sottolineare il fatto che il separato solido presenta anche valori di pH alti (8,0 – 8,5). In tali condizioni l'ammonio presente nel materiale è suscettibile di una forte volatilizzazione, che viene accentuata dalla natura porosa del substrato e dai sistemi di stoccaggio aziendali poco idonei alla conservazione, senza perdite, di detto materiale. Il separato solido è quindi un apportatore al suolo di sostanza organica recalcitrante con notevole potere ammendante, le dinamiche di mineralizzazione evidenziano una scarsa capacità di fornire azoto assimilabile.
- 9) La natura della frazione solida del digestato è condizionata notevolmente dal tipo di biomassa in cofermentazione col liquame, che a seconda dell'origine, apporta materiale recalcitrante di diversa natura e che va a costituire, in fase di separazione la frazione solida del digestato separato.
- 10) Nel nostro caso il materiale non fermentabile che viene apportato dal trinciato di mais di mais è costituito dalle fibre acido detersive e dalla lignina acido detersa (Van Soest), mentre nel caso del FORSU in gran parte è riconducibile a materie plastiche e inerti di altra origine. Dunque il trinciato di mais di mais va a produrre sostanza organica non labile con notevole potere ammendante; al contrario il FORSU è apportatore di materiale inerte.
- 11) Il digestato integrale essendo costituito dalle frazioni liquide e solide ha un comportamento intermedio tra le due frazioni separate. Tuttavia sul comportamento nel corso della mineralizzazione conta anche la tipologia del trinciato di mais stesso (es. diversa umidità alla raccolta o diversa maturità della pianta).

Concludendo, le caratteristiche di mineralizzazione nel suolo dei digestati nelle loro diverse frazioni sono paragonabili fra loro per tipo di frazione (liquida, solida e integrale).

La natura del substrato in cofermentazione condiziona notevolmente le rese di separazione, le cinetiche di mineralizzazione e le efficienze di fertilizzazione (per quanto riguarda l'azoto), ciò è riconducibile soprattutto alla natura del materiale scarsamente o totalmente non fermentabile e mineralizzabile contenuto nelle varie frazioni.

I dati esposti mostrano l'importanza di queste ricerche al fine di ben caratterizzare i materiali che vanno gestiti agronomicamente per la fertilizzazione delle colture. Al fine di ottenere dati quanto più esaustivi di caratterizzazione a questo riguardo dei più diversi digestati. Tuttavia il lavoro finale è quello di implementare modelli atti a fornire al tecnico, nel modo semplice i dati di base per redigere correttamente i piani di concimazione.

4. STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN COMPRESORIO FUNZIONALE ALLA UTILIZZAZIONE AGRONOMICA DEGLI EFFLUENTI DI UN DIGESTORE ANAEROBICO

4.1 Il contesto agricolo e ambientale

Il digestore anaerobico preso in considerazione per realizzare uno studio comprensoriale si trova nel comune di Formigara, in provincia di Cremona.

L'impianto ha una produzione potenziale di 1 MWe e per questa è stato studiato il comprensorio.

I comuni dell'ipotetico comprensorio sono riportati in tabella con la distanza in km dal comune di Formigara.

Tabella 17 – Comuni del comprensorio

Cod, ISTAT	Comune	Distanza (km)
19003	ANNICCO	16
19013	CAPPELLA CANTONE	7,5
19044	FORMIGARA	0
19049	GOMBITO	7,5
19051	GRUMELLO CR,SE	12
19076	PIZZIGHETTONE	5
19088	SAN BASSANO	4,5
	Media	7,5

Per contestualizzare la situazione zootecnica e il carico di azoto della zona intorno al digestore riportiamo i dati presenti nel SIARL (dati tratti dal progetto NILO in via di pubblicazione) riguardo alcune variabili:

– totale ha SAU disponibile =	6.177,65
– kg azoto/ha =	306,06
– totale kg azoto prodotto =	1.890,715
– n. totale capi bovini =	19.559
– n. totale vacche da latte =	9.225
– n. totale suini =	93.800

L'area intorno al digestore presenta quindi una situazione di base già di per sé critica avendo un carico medio di 306 kg/ha di AZOTO a fronte di un limite ammesso di 170 kg/ha, essendo per la maggior parte zona non vulnerabile (ZVN).

4.2 Il valore economico dell'Azoto

In un'ottica di ottimizzazione e sfruttamento delle risorse conviene dare un valore economico all'azoto prodotto, Nel grafico sotto riportato si descrive l'andamento del prezzo mondiale dell'urea in \$/t.

Nella tabella si stima il valore di azoto in eccesso per ettaro ($306 - 170 = 136$ kg/ha) riportato al prezzo mondiale dell'urea, in pratica ogni ettaro del comprensorio ha una risorsa (azoto) in eccesso pari ad un valore medio (ultimi 3 anni) di 73,00 €.

Figura 35 – Andamento del prezzo mondiale dell'urea in \$/t

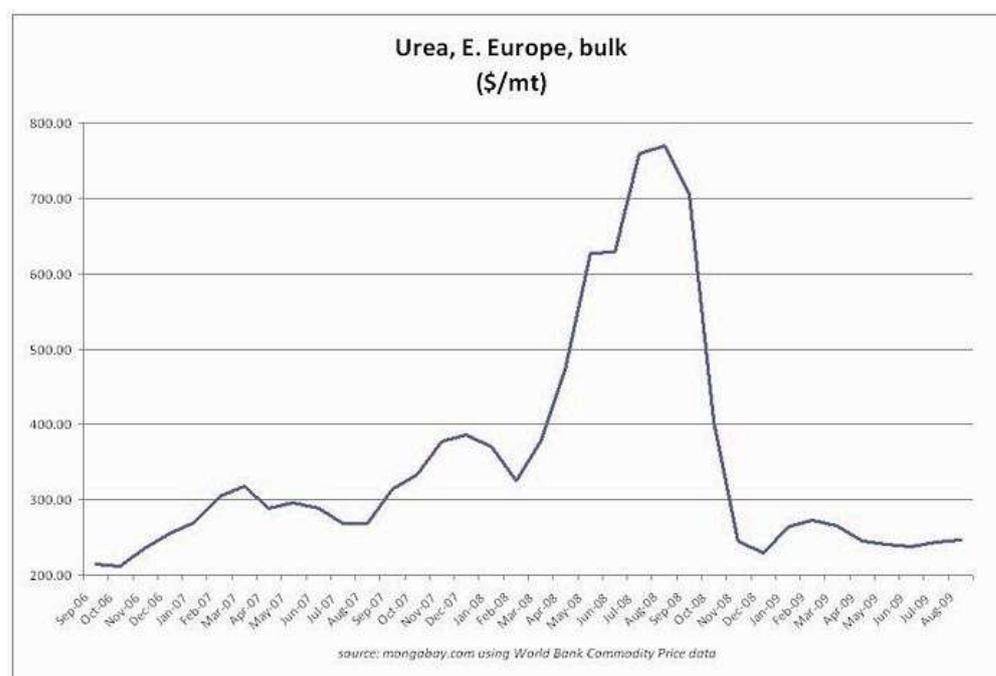


Tabella 18 – Valore di azoto in eccesso per ettaro ($306 - 170 = 136$ kg/ha) riportato al prezzo mondiale dell'urea

periodo	Urea (\$/t) (media annua)	Cambio (€/€)	Urea (€/t) (mercato mondiale)	Titolo (% N)	N (€/kg) in forma Urea (prezzi mondiali)	N (kg/ha) in eccesso	N/ha in eccesso
2007	309,4	1,37	225,8	46	0,49	136	66,77
2008	492,7	1,47	335,2	46	0,73	136	99,09
2009 (gen-ago)	252,0	1,36	185,3	46	0,40	136	54,78
Prezzo medio (2007-2009)							73,55

4.3 Esigenze legate ai reflui immessi nel digestore

Nel digestore vengono immessi reflui zootecnici provenienti dall'allevamento suinicolo e biomasse vegetali rappresentate principalmente da trinciato integrale di mais insilato.

4.3.1 Reflui zootecnici utilizzati

Premesso che l'utilizzo dei reflui dei giovani suinetti periodicamente trattati con prodotti medicinali a fini curativi o preventivi è sconsigliato nei digestori per la loro possibile negativa influenza sulle fermentazioni, nell'impianto viene utilizzato l'80% circa dei reflui prodotti dai circa 7.500 suini.

Con i dati delle tabelle in uso per i PUA aziendali si può calcolare che i 7.482 suini dell'allevamento producono un quantitativo di refluo complessivo pari a 24.915 t, di cui circa 19.932 t vengono convogliate ai digestori dell'impianto di biogas.

Queste 19.932 t di refluo zootecnico contengono i seguenti elementi fertilizzanti:

- 72.590,00 kg di N
- 70.031,52 kg di P₂O₅
- 80.132,22 kg di K₂O

In una ZVN, essendo il limite di azoto di derivazione zootecnica di 170 kg/ha, la quantità di azoto sopra esposta richiede una SAU di circa 427 ha per gli spandimenti.

4.3.2 *Biomasse vegetali*

Dalle indagini effettuate negli anni 2007 e 2008 è emerso che il rapporto effluenti zootecnici - biomasse vegetali in tonnellate e circa 1:1, Ciò significa che il silomais (32-35% di s.s.) annualmente immesso è pari a circa 17.500-18.000 t. Considerando che le biomasse vegetali, in modo particolare l'insilato di mais, contengono in base alla letteratura, azoto per 4,8 kg/t di tal quale, il quantitativo di azoto complessivo fornito dalla biomassa vegetale nel digestato è stimabile in 84.000-86.000 kg.

Ne consegue che l'apporto di digestato è stimabile in (19.932 + 17.500) = 37.432 t e l'azoto annualmente apportato in (72.590 + 85.000) = 156.590 kg,

Dato totalmente confermato dalle analisi dei digestati eseguite nel biennio 2007-2009 presso il Di.Pro.Ve. dell'Università degli Studi di Milano.

Pertanto, considerando che l'apporto massimo di azoto in coltivazioni quali il mais, può essere di 340 kg/ha (di cui 170 kg di origine zootecnica), la quantità di azoto sopra esposta richiede una SAU di circa (156.590/340) = 460,56 ha e tale dovrebbe essere la superficie minima di un potenziale comprensorio sotteso all'impianto.

4.4 **Comprensorio attuato (2009-2010)**

Nella tabella sono riportate le superfici delle aziende che hanno aderito alla proposta di comprensorio.

Nella fase di studio attuata nell'anno 2008 i potenziali interlocutori che avevano manifestato un interesse, avevano complessivamente una SAU di circa 800 ha.

Purtroppo, gran parte di queste aziende agricole non hanno confermato la loro disponibilità e all'inizio del 2009 la superficie disponibile era di 310 ha circa, di cui 298 ha in ZV e 12,5 ha in ZNV.

Nel 2010 è venuta meno la disponibilità di due aziende per un totale di 32 ha, ma nel contempo l'azienda agricola titolare dell'impianto ha acquisito altri 40 ha in affitto; ne consegue che ad oggi il comprensorio è di circa 318 ha.

Tabella 19 – Superfici delle aziende agricole del comprensorio e riparto colturale 2009

Comune	Convenzioni 2009 (ha)		Erbaio di graminacee + mais trinciato	Mais granella	Altre colture	Convenzioni 2010 (ha)	
	ZVN	NO-ZVN				ZVN	NO-ZVN
Formigara	101,93		101,93			101,93	
Annicco		12,15	12,15				12,15
Cappella Cantone	23,50			23,50		23,50	
Castelleone	10,63			10,63		10,63	
Castelleone	38,05			38,05		38,05	
Formigara	10,12			10,12		-	
Formigara	10,97			10,97		10,97	
Formigara	22,05			22,05		-	
Formigara	-					20,00	
Formigara	-					20,00	
San Bassano	7,28			7,28		7,28	
San Bassano	9,21			9,21		9,21	
San Bassano	12,48			8,89	3,59	12,48	
San Bassano	17,12			17,12		17,12	
San Bassano	24,72			21,42	3,30	24,72	
Soresina	10,00			10,00		10,00	
TOTALE (ha)	298,06	12,15	114,08	186,29	9,84	265,89	12,15
TOTALE/anno (ha)		310,21				318,04	

Tale comprensorio prevede la possibilità da parte del gestore dell'impianto di biogas di distribuire il digestato sui terreni delle aziende agricole aderenti.

I conferimenti e le distribuzioni sono stati formalizzati attraverso apposite convenzioni e trovano riscontro anche nel PUA.

I terreni situati in comune di Formigara 101,93 ha e di Annicco 12,15 ha, per complessivi 114,08 ha, sono condotti e coltivati direttamente dall'azienda agricola proprietaria dell'impianto di biogas, mentre i rimanenti 196,13 ha nel 2009 e 204,76 ha nel 2010 sono in convenzione con altre aziende agricole.

4.5 Elementi di valutazione del comprensorio

4.5.1 Vantaggi

4.5.1.1 Utilizzo del digestato come concimante

Il digestato prodotto annualmente è di 37,432 t, In un comprensorio potenziale di 460,56 ha, con una uniforme distribuzione del digestato, i quantitativi ad ettaro di apporto fertilizzante alle coltivazioni agricole sarebbero i seguenti:

Tabella 20 – Quantitativi ad ettaro di apporto fertilizzante alle coltivazioni agricole con una uniforme distribuzione del digestato, in un comprensorio potenziale di 463,5 ha

	Contenuto medio (indice)	Apporto stimabile ¹ (kg)	Apporto fertilizzante (kg/ha)
N	0,42	157.214	157,02
P ₂ O ₅	0,16	59.891	130,00
K ₂ O	0,33	123.526	268,00

¹ Fatte le dovute considerazioni, considerando il notevole numero di analisi che sono state eseguite con una periodicità quasi mensile, si considerano definitivi i dati ottenuti dalle analisi di laboratorio eseguite nel triennio 2007-2009 presso il Di.Pro.Ve. di Milano

n.b.

Il dato dell'azoto conferma pienamente quanto stimato (156.590,36 kg).

Il dato del potassio (K₂O) di 123.526 kg è attendibile, in quanto ai 80.132,22 kg apportati dal refluo zootecnico va sommato l'apporto della biomassa vegetale.

Perplessità suscita invece il dato del fosforo (P₂O₅), Infatti, in base alle analisi di laboratorio del digestato l'apporto di P₂O₅ dovrebbe essere di 59,891 kg complessivi, con un massimo di 71.120,8 kg, mentre dal PUA risulta un apporto di 70.031,52 kg solo per il refluo zootecnico,

Ne consegue che l'utilizzo del digestato, per qualsiasi coltivazione erbacea, annulla totalmente le concimazioni chimiche dei terreni per quanto concerne il fosforo ed il potassio e diminuisce notevolmente quelle azotate. La stessa coltivazione del mais necessita unicamente di urea nella fase di inizio levata (rincalzatura).

Tabella 21 – Conteggio del risparmio a ettaro

	costo dei fertilizzanti (€/kg)	Concimazione ¹ (kg/ha)	coefficiente di efficienza ²	risparmio a ettaro (€/ha)
N	0,65	340	0,46	101,66
P ₂ O ₅	0,60	120		72,00
K ₂ O	0,58	180		104,40
TOTALE				278,06
costo di distribuzione n, 2 concimazioni non effettuate in fase di presemina e allo stadio di terza/quarta foglia				40,00
TOTALE				318,06
Totale risparmio ettari ipotetico comprensorio (460,56 ha) = 146.485,71 €				
¹ per una coltivazione tipo mais (parte insilato e parte granella)				
² come riportato nella domanda di Procedimento Gestione Nitrati				

4.5.2 Criticità

4.5.2.1 Difficoltà a creare un comprensorio idoneo e limitrofo all'impianto

Come si evidenzia nell'allegata planimetria i terreni reperiti come comprensorio oltre ad essere notevolmente insufficienti rispetto all'esigenza dell'utilizzo del digestato, sono dislocati a "macchia di leopardo" con distanze dall'impianto variabili tra i 2 e gli 8 km.

Il risultato ottenuto è stato molto inferiore alle attese ed insufficiente ad una corretta e duratura gestione del digestato prodotto dall'impianto.

Inizialmente, da un primo sondaggio effettuato nel 2008, al fine di verificare la disponibilità delle realtà agricole presenti sul territorio, era stato raccolto un interesse di imprenditori agricoli per una superficie coltivata di più di 800 ettari, nel 2009 e nel 2010 tale disponibilità notevolmente diminuita fino agli attuali 318 ha pari al 70% della superficie realmente necessaria per un corretto utilizzo del digestato.

Le cause principali di tale "insuccesso" sono così riassumibili:

- presenza sul territorio limitrofo di numerose stalle, con conseguente difficoltà delle aziende a utilizzare agronomicamente oltre al proprio refluo zootecnico del digestato;
- titubanza degli agricoltori ad utilizzare un prodotto proveniente da un'altra azienda agricola, manifestando una non fiducia sulla qualità del digestato;
- pretese economiche eccessive da parte degli imprenditori agricoli confinanti che non reputano già sufficientemente conveniente il risparmio di fertilizzante chimico.

4.5.2.2 Dipendenza da altre realtà per la distribuzione del digestato

Quanto sopra esposto, evidenzia una notevole fragilità da parte delle aziende agricole a mantenere una disponibilità stabile e duratura per l'utilizzo agronomico del digestato. Ne consegue che l'azienda agricola proprietaria dell'impianto deve ogni anno reperire sul territorio realtà con le quali instaurare nuove convenzioni.

Questo fatto determina notevoli difficoltà organizzative, perdite di tempo e soprattutto insicurezza nella corretta gestione di pratiche agronomiche che, se non correttamente attuate, possono anche essere causa di procedimenti legali a carico del proprietario dell'impianto.

4.5.2.3 Costi di logistica per la distribuzione del digestato

I costi di logistica per la distribuzione del digestato che il gestore dell'impianto deve sostenere sono molto variabili e risentono di moltissimi fattori.

Nella tabella sottostante si è calcolato il costo di distribuzione per metro cubo del digestato in funzione di alcune variabili presenti nel comprensorio. La prima variabile è rappresentata dai metri cubi di digestato che è la quantità dei metri cubi di liquame suino a cui si aggiunge la quantità di biomassa vegetale immessa. Il totale dei metri cubi di digestato da distribuire all'interno del comprensorio è di 37.432 t, pari a circa 1.871 viaggi di una bonza da 20 m³ di portata. La distanza media dei campi dal digestore è stata calcolata in circa 7 Km e, di conseguenza il tempo per la distribuzione di una bonza è stato stimato in media in circa 1 h di lavoro,

Nel calcolare i costi bisogna arrivare a quantificare il numero di mezzi coinvolti nelle operazioni. Stimando che i giorni totali disponibili per gli spandimenti siano circa 120 all'anno si ottiene un numero di bonze necessarie che oscilla tra 1,5 e 2 in funzione del fatto di prevedere le manutenzioni e le eventuali rotture dei mezzi.

Calcolando poi i costi di gestione e operativi, oltre che quelli di ammortamento dei mezzi, si viene a stimare prudenzialmente un costo medio che oscilla tra i 3 e i 4 €/m³ cubo pari a circa 60-80 € per viaggio di una bonza.

Tabella 22 – Stima dei costi di distribuzione del digestato

metri cubi (m ³) digestato TOT anno	37.432
portata bonza m ³	20
numero viaggi / anno	1.872
giorni disponibili per gli spandimenti (365 al netto dei giorni festivi, eventi meteorologici, divieti e presenza mais in campo)	120
numero viaggi necessari / giorno disponibile	16
distanza media dal digestore (km)	7
durata operazioni (carico+distribuzione+viaggio) di smaltimento per viaggio (h)	1
ore lavorative giorno (h)	8
numero di bonze necessarie in contemporanea	2
numero bonze necessarie x 1,5 coefficiente rischio guasti e manutenzione	3
costo smaltimento a metro cubo (€/m ³)	3,00 – 4,00
costo smaltimento a viaggio (€/viaggio)	60,00 – 80,00
Costo complessivo per l'utilizzo agronomico del digestato (€)	112.000,00 – 150.000,00

4.6 Gestione del digestato nel comprensorio delimitato nel 2009

4.6.1 Aziende agricole in convenzione

Da un'attenta visione del PUA, emerge che nelle aziende convenzionate, con una disponibilità complessiva nel 2009 di soli 196,13 ha, sono stati complessivamente distribuite le seguenti quantità di digestato:

Tabella 23 – Risparmio ad ettaro nel comprensorio (aziende convenzionate) per il mancato utilizzo di fertilizzante chimico

	Apporto fertilizzante (kg)	Concimazione (kg/ha)	Costo (€/kg)	Risparmio comprensorio (€)
N	44.588	227	0,65	13.332,02
P ₂ O ₅	16.986	87	0,60	10.191,60
K ₂ O	35.034	174	0,58	20.319,71
TOTALE				43.843,44
mancata effettuazione operazioni di concimazione (40,00 €/ha)				7.845,20
TOTALE				51.688,64
Risparmio ettaro (196,13 ha) =263,54 €				

Tabella 24 – Risparmio complessivo per azienda in convenzione

Comune	Convenzioni 2009 (ha)	Refluo (m ³)*	Risparmio (€)				TOTALE
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Operazioni meccaniche	
Cappella Cantone	23,50	1.990,96	2.500,25	1.911,32	3.810,70	940,00	9.162,27
Castelleone	10,63	505,93	635,35	485,69	968,35	425,20	2.514,59
Castelleone	38,05	1.830,40	2.298,62	1.757,18	3.503,39	1.522,00	9.081,19
Formigara	10,12	588,20	738,66	564,67	1.125,81	404,80	2.833,95
Formigara	10,97	493,59	619,85	473,85	944,73	438,80	2.477,23
Formigara	22,05	1.015,98	1.275,87	975,34	1.944,59	882,00	5.077,79
San Bassano	7,28	287,93	361,58	276,41	551,10	291,20	1.480,29
San Bassano	9,21	440,12	552,70	422,52	842,39	368,40	2.186,01
San Bassano	12,48	608,76	764,48	584,41	1.165,17	499,20	3.013,26
San Bassano	17,12	814,43	1.022,76	781,85	1.558,82	684,80	4.048,23
San Bassano	24,72	1.192,85	1.497,98	1.145,14	2.283,11	988,80	5.915,03
Soresina	10,00	847,21	1.063,91	813,31	1.621,54	400,00	3.898,77
TOTALE	196,13	10.616,36	13.332,01	10.191,70	20.319,95	7.845,20	51.688,86

* assunto che 1 t = 1 m³

Al valore sopra esposto va aggiunto il risparmio ad ettaro dell'azienda agricola proprietaria dell'impianto e conduttrice di complessivi 114,08 ha (101,93 ha ZVN a Formigara e 12,15 ha NO-ZVN ad Anicco).

Come risparmio ad ettaro si è considerato quello stimato ed evidenziato precedentemente (Figura 21) di 318,06 €/ha per complessivi 36.284,25 € sull'intera superficie aziendale (114,08 ha).

Ne consegue che l'effettivo risparmio nel comprensorio nell'anno 2009, per il non utilizzo di fertilizzante chimico dovuto all'utilizzo del digestato, è quantificabile complessivamente in $(51.688,64 + 36.284,25) \text{ €} = 87.973,11 \text{ €}$.

Le aziende agricole che hanno ricevuto il digestato hanno nel 2009 notevolmente ridotto, praticamente dimezzato l'impiego dei concimi chimici.

Nel 2010 la tendenza è stata quella di eliminare totalmente la concimazione chimica fosfo-potassica e di limitarsi ad un utilizzo dell'azoto in fase di rincalzatura sul mais.

4.6.2 Azienda agricola proprietaria dell'impianto di biogas

Al fine di potenziare la possibilità di utilizzo agronomico del digestato la superficie agricola a disposizione di complessivi 114.08.87 ha viene coltivata con una successione colturale annuale di erbaio di graminacea (triticale) e mais da insilato.

Da un'attenta analisi del PUA aziendale si evidenzia che con questa successione colturale l'azienda diventa conforme per quanto concerne l'azoto utilizzato dalle colture, ma rimane non conforme nel rapporto azoto prodotto rispetto al quello disponibile nel terreno.

L'azienda ha eliminato sull'erbaio di graminacea qualsiasi utilizzo di concime chimico e si è limitata ad una ridotta concimazione chimica alla rincalzatura-sarchiatura del mais.

4.7 Conclusioni

- 1) L'ipotesi di creare dei comprensori per la gestione del digestato prodotto da un impianto di biogas nasce dal fatto che normalmente, come nel caso oggetto di studio, una realtà agricola non possiede un quantitativo di terreno coltivato sufficiente alla gestione agronomica del digestato stesso. Evidentemente tale problematica si accentua nel caso di terreni agricoli situati in Zone Vulnerabili.
- 2) L'imprenditore agricolo deve organizzarsi creando un comprensorio il più limitrofo possibile all'impianto, attraverso la sottoscrizione di convenzioni con altri imprenditori agricoli.
- 3) La realtà comprensoriale si è dimostrata essere nel tempo assai precaria, di difficile gestione, economicamente onerosa.
- 4) La gestione della realtà comprensoriale può essere affrontata con qualche possibilità di successo, solamente se limitrofa all'impianto (raggio di circa 5-7 km) preventivamente organizzata, affidata ad un'impresa agromeccanica attrezzata in modo idoneo.
- 5) La precarietà e l'onerosità della realtà comprensoriale, sta spingendo l'imprenditore agricolo proprietario di un impianto di digestore di biogas a mettere in atto soluzioni alternative, che lo rendano il più possibile indipendente dall'adesione di imprese agricole extra-aziendali.
- 6) Tra le possibili alternative è in fase di elaborazione, da parte dell'azienda agricola proprietaria dell'impianto oggetto di studio, un progetto per "strappare" l'ammoniaca ed essiccare il digestato, impiegando in questo modo l'energia termica oggi non utilizzata.

5. Bibliografia

H. B. Møller, I Lund, S.G. Sommer *Solid-liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost*, Bioresource Technology 74 (2000) 223-229,

Tommaso Maggiore – *Attività di valutazione del mais per destinazione energetica, Relazione 2007/2008 – Chiusura II anno di attività*, ERSAF