



**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE PER  
L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO**  
XI Ciclo - Nuova Serie (2009-2012)  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO**

**SOLUZIONI INNOVATIVE PER IL  
RECUPERO DI MATERIA DAL CICLO DEI  
RIFIUTI**

**INNOVATIVE SOLUTIONS FOR THE RECOVERY  
OF MATTER FROM WASTE MANAGEMENT  
CYCLE**

**DOTT.SSA ANNA FARINA**

Relatore:

PROF. ING. RODOLFO M.A. NAPOLI

Coordinatore

PROF. ING. VINCENZO BELGIORNO

Correlatore:

PROF. ING. VINCENZO BELGIORNO



---

*In copertina: note sull'eventuale immagine in copertina*

Soluzioni innovative per il Recupero di materia dal ciclo dei rifiuti

---

Copyright © 2013 Università degli Studi di Salerno – via Giovanni Paolo II, 132 – 84084 Fisciano (SA), Italy – web: [www.unisa.it](http://www.unisa.it)

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico, cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazione ivi contenute.

Finito di stampare il 10/02/2014



---

*A Rebecca, Sara, Zoe  
e Gianluca*

*"Se ci fermassimo a considerare ciò che ha buon senso e ciò che non lo ha, ciò che è possibile e ciò che non lo è, la terra smetterebbe di girare. E la vita perderebbe il suo scopo"*  
*(Oriana Fallaci)*



---

## INDICE GENERALE

SOLUZIONI INNOVATIVE PER IL RECUPERO DI MATERIA DAL CICLO DEI RIFIUTI .....	i
INDICE GENERALE.....	i
Indice delle figure.....	iv
Indice delle tabelle.....	viii
SOMMARIO .....	xii
ABSTRACT .....	xv
RINGRAZIAMENTI.....	xvii
About the author.....	xviii
1 INTRODUZIONE .....	1
1.1 Obiettivi.....	2
1.2 Struttura dell'elaborato di tesi.....	3
2 LA CARATTERIZZAZIONE DEI RIFIUTI.....	5
2.1 Origine e tipologie.....	6
2.1.1 Composizione merceologica .....	7
2.2 Il sistema integrato di gestione dei rifiuti solidi urbani.....	11
2.2.1 I sistemi di selezione meccanica .....	16
2.3 Le frazioni destinate al recupero di materia .....	17
2.3.1 Frazioni secche.....	21
2.3.2 Frazioni umide .....	26
2.3.3 Le caratteristiche qualitative della frazione organica da selezione meccanica .....	29
2.4 La tossicità dei rifiuti solidi .....	37
2.4.1 La tossicità delle frazioni secche del rifiuto .....	38
2.4.2 La tossicità della Frazione umida .....	47
3 FORME DI RECUPERO DEL MATERIALE CELLULOSICO.....	53
3.1 Tecnologie convenzionali per il recupero della carta.....	56
3.2 Il riutilizzo alternativo dei rifiuti cellulosici .....	60
4 IL TRATTAMENTO DELLA FRAZIONE ORGANICA .....	67
4.1 Il compostaggio di qualità.....	68
4.2 La digestione anaerobica .....	74
4.3 La biostabilizzazione aerobica.....	83

4.4	La bioessiccazione.....	85
5	L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	87
5.1	Programma sperimentale .....	87
6	MATERIALI E METODI .....	89
6.1	Caratterizzazione e trattabilità biologica del materiale cellulosico.....	89
6.1.1	Ciclo di processo e campionamento .....	89
6.1.2	Caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani .....	94
6.1.3	Caratterizzazione prestazionale e chimico-fisica del materiale semi-lavorato .....	96
6.1.4	Caratterizzazione chimico- fisica del materiale esausto ....	102
6.1.5	Set-up sperimentale per la verifica della trattabilità biologica del materiale esausto.....	107
6.2	caratterizzazione e trattabilità biologica della frazione organica da selezione meccanica.....	108
6.2.1	Processo produttivo dell'impianto e campionamento .....	109
6.2.2	Caratterizzazione del materiale organico.....	115
6.2.3	Set-up sperimentale per la verifica della trattabilità biologica in condizioni aerobiche .....	118
6.2.4	Set-up sperimentale per la verifica della degradazione in condizioni anaerobiche .....	121
7	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	127
7.1	Caratterizzazione e trattabilità biologica del materiale cellulosico.....	127
7.1.1	La caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani.....	127
7.1.2	La caratterizzazione del materiale semi-lavorato.....	130
7.1.3	La verifica della trattabilità biologica del materiale esausto .... .....	138
7.2	Caratterizzazione e trattabilità biologica del materiale organico .....	141
7.2.1	La caratterizzazione della FUT.....	141
7.2.2	La verifica della trattabilità biologica in condizioni aerobiche 144	
7.2.3	La verifica della degradazione in condizioni anaerobiche	147
8	CONCLUSIONI.....	151
	Bibliografia .....	155

---

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 Gerarchia dei rifiuti (Cipriano, 2011).....	11
Figura 2.2 Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani, anno 2012 (ISPRA, 2013) .....	13
Figura 2.3 Il sistema integrato di gestione dei rifiuti solidi urbani. ....	13
Figura 2.4 Ciclo della raccolta indifferenziata (D’Amico et al. 2007) .....	14
Figura 2.5 Ciclo della raccolta differenziata (D’Amico et al. 2007) .....	15
Figura 2.6 Schema di funzionamento di un impianto di selezione complesso a servizio della produzione di compost (Cecchi et al., 2003)	17
Figura 2.7 - Raccolta differenziata per frazione merceologica, anni 2010-2012 .....	21
Figura 2.8 Ripartizione percentuale dei TS nella frazione organica da impianto a tecnologia “complessa”. (Cecchi et al., 2003).....	31
Figura 2.9 Ripartizione percentuale dei TVS nella frazione organica da impianto a tecnologia “complessa”. (Cecchi et al., 2003).....	32
Figura 2.10 Ripartizione percentuale delle classi merceologiche sui campioni ottenuti con vaglio minore con linea di selezione “mediamente complessa” (Cecchi et al., 2003).....	33
Figura 2.11 Ripartizione percentuale delle classi merceologiche sui campioni ottenuti con vaglio a maglie maggiori con linea di selezione “mediamente complessa” (Cecchi et al.,2003) .....	34
Figura 2.12 – Struttura chimica del diisobuthylftalato (DIBP).....	38
Figura 2.13 – Struttura chimica del Bisfenolo A.....	39
Figura 2.14 – Struttura chimica del benzo[a]pirene.....	41
Figura 3.1 - Produzione dei rifiuti di imballaggio nell’UE per frazione merceologica (ripartizione percentuale), anno 2010 (Rapporto Ispra 2013).....	55
Figura 3.2- Distribuzione percentuale del recupero dei rifiuti da imballaggio, anni 2007–2011. (Rapporto ISPRA 2013).....	55
Figura 3.3 - Destino dei prodotti in carta e cartone immessi al consumo in Italia nel 2012 (COMIECO, 2012).....	57
Figura 3.4- Schema del Ciclo di cartiera.....	59
Figura 3.5- Particolare dei singoli elementi della eco-lettiera (US Patent 6 276 300B1) .....	63

---

Figura 3.6- Tipi di elementi di lettiera in commercio (US Patent 6 276 300B1).....	63
Figura 3.7- Processo di produzione della lettiera US Patent 2010/0006035.....	64
Figura 4.1 - Opzioni di trattamento della FORSU.....	68
Figura 4.2- Andamento della temperatura nel corso del processo di stabilizzazione aerobica (d'Antonio G.).....	70
Figura 6.1 Ciclo di processo adottato dalla Di Canto Spa.....	90
Figura 6.2 Il sistema meccanico messo a punto dalla Di Canto Spa .....	91
Figura 6.3 Il tritratore .....	92
Figura 6.4- Il nastro trasportatore ed il sistema per la raccolta delle polveri .....	92
Figura 6.5 Il sistema di insacchettamento del materiale.....	93
Figura 6.6 - Particolare della prova per determinare la capacità assorbente .....	98
Figura 6.7 Sistema sperimentale per la determinazione del rilascio di ammoniac.....	99
L'impatto odorigeno del materiale è stato valutato, altresì, determinando la concentrazione di odore attraverso l'applicazione della tecnica sensoriale dell'olfattometria dinamica. Le analisi sono state condotte in conformità con la metodica EN 13725:2003, utilizzando l'olfattometro dinamico della serie T08 (ECOMA GmbH, Germania), in dotazione al Laboratorio di Ingegneria Sanitaria dell'Università degli Studi di Salerno, mostrato in Figura 6.8.....	99
Figura 6.8- Olfattometro TO8 .....	100
Figura 6.9 La paglia adoperata per i test comparativi.....	102
Figura 6.10 Impiego del materiale cartaceo come lettiera .....	103
Figura 6.11 Impianto pilota utilizzato per le prove di trattabilità biologica del materiale esausto .....	107
Figura 6.12 Sezione del singolo reattore .....	108
Figura 6.13 Frazione a prevalente contenuto di materiale putrescibile (FUT) .....	113
Figura 6.14 Frazione secca a prevalente contenuto di materiale combustibile (FST).....	114
Figura 6.15 Frazione secca a prevalente contenuto di materiale recuperabile .....	114
Figura 6.16 La FUT oggetto di studio.....	115
Figura 6.17 Respirometroadiabatico Costech International.....	116
Figura 6.18 Schema del respirometro aerobico a flusso continuo .....	117

Figura 6.19 - Reattori e compressore per l'alimentazione dell'aria. ....	119
Figura 6.20 - Veduta dell'interno del reattore di biostabilizzazione.....	119
Figura 6.21 - Particolare del sistema di diffusori e raccordi per la diffusione dell'aria. ....	120
Figura 6.22 - Particolare tubazione di raccolta del percolato.....	120
Figura 6.23 - FUTsminuzzata.....	123
Figura 6.24 Preparazione miscele.....	123
Figura 6.25- Bagno termostato contenente i reattori.....	124
Figura 6.26 Innalzamento livello mediante pompa peristaltica. ....	124
Figura 7.1 Confronto tra i valori pH dei diversi materiali in esame.....	133
Figura 7.2 Confronto tra i livelli di massima ritenzione idrica.....	134
Figura 7.3 Rilascio di ammoniaca: concentrazione di ammoniaca nel tempo .....	135
Figura 7.4 Rilascio di ammoniaca: il fattore di emissione valutato sulle 24 h .....	136
Figura 7.5 Concentrazione di odore relativa al materiale cartaceo imbibito della soluzione ammoniacale .....	136
Figura 7.6 Confronto dei valori medi di IRD ottenuti in questo studio con quelli di letteratura. ....	145
Figura 7.7- Produzione di biogas cumulata FUT.....	147
Figura 7.8- Produzione di biogas cumulata frazione organica.....	148
Figura 7.9 Produzione di biogas cumulata con frazione organica 10%.	148

---

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1-Metodiche di analisi merceologica (ANPA, 2000).....	9
Tabella 2.2- Dimensione del campione per l'analisi merceologica in funzione del numero di abitanti (Sirini et al., 2010) .....	10
Tabella 2.3 Raccolta differenziata delle principali frazioni merceologiche su scala nazionale, anni 2007 - 2012. ....	20
Tabella 2.4 Society of the Plastics Industry .....	24
Tabella 2.5 Caratteristiche della frazione organica da grandi utenze riportate in alcuni esempi di letteratura (Pavan et al., 2007) .....	27
Tabella 2.6 Caratteristiche della frazione organica raccolta presso mense (Pavan et al., 2007) .....	27
Tabella 2.7 Caratteristiche medie della frazione organica da mercato ortofrutticolo (Pavan et al., 2007) .....	28
Tabella 2.8 Caratteristiche della frazione organica da raccolta differenziata ottenute in diverse campagne di ricerca (Pavan et al., 2007) .....	28
Tabella 2.9 Caratteristiche chimico-fisiche della frazione organica analizzate durante il periodo di un anno (APAT, 2005) .....	29
Tabella 2.10 Caratteristiche chimico- fisiche della frazione organica proveniente da un impianto di selezione di tipo “complesso” (Cecchi et al.,2003).....	30
Tabella 2.11 Caratteristiche merceologiche della frazione organica da selezione meccanica. I risultati sono espressi come percentuale di TS e TVS di ciascuna frazione al totale (Cecchi et al.,2003) .....	31
Tabella 2.12 Caratterizzazione chimico-fisica del rifiuto proveniente da impianto di tipo “mediamente complesso”(Cecchi et al.,2003) .....	32
Tabella 2.13 Caratterizzazione merceologica del rifiuto selezionato con vaglio a maglie di sezione ridotta in linea di selezione “semplice-mediamente complessa” (Cecchi et al.,2003) .....	33
Tabella 2.14 Analisi merceologica relative al campione ottenuto con vaglio a maglie maggiori(Cecchi et al.,2003).....	34
Tabella 2.15 Caratteristiche chimico- fisiche della frazione organica proveniente dall'impianto di selezione meccanica di San Giorgio di Nogaro (Mata -Alvarez, 1995).....	35

---

Tabella 2.16 Caratteristiche della frazione organica da selezione meccanica e da raccolta differenziata(Bolzonella et al., 2006) .....	35
Tabella 2.17 composizione merceologica della frazione organica da selezione meccanica (Bolzonella et al., 2006) .....	36
Tabella 2.18 Valori di $B_0$ relativi alle diverse matrici considerate( Mata-Alvarez et al, 1992).....	36
Tabella 2.19 Rese di conversione a tempo infinito per i tre tipi di frazione organica (FO).....	37
Tabella 2.20 – Valori dell’indice di emissione e dell’indice di esposizione relative ai diversi campioni di cartone di pizza d’asporto (Bononi et al. 2007).....	40
Tabella 2.21- Concentrazione media di polvere, IPA e omologhi (Chalbot 2006). .....	42
Tabella 2.22 – Fattori di tossicità $TEF_i$ (Servos et al. 2000).....	45
Tabella 2.23 – Principali IPA e loro caratteristiche.....	48
Tabella 2.24 – Percentuali di VOC emessi da particolari tipologie di rifiuti organici e dalla loro miscela .....	49
Tabella 2.25. – Metalli pesanti presenti negli output degli MBT e nel compost (Krauss e Grammel, 1992).....	51
Tabella 3.1 Caratteristiche qualitative dei rifiuti cellulosici avviabili alle procedure semplificate.....	54
Tabella 3.2 - Immesso al consumo, riciclaggio e recupero degli imballaggi cellulosici (1.000*tonnellate), anni 2000–2011 (ISPRA – COMIECO, 2013).....	56
Tabella 3.3- Le lettiere in carta riciclata presenti sul mercato .....	61
Tabella 3.4- capacità di assorbire urina dei sei differenti materiali usati come lettiere e emissione di $NH_3$ nelle 48h (Misselbrook T.H., et al, 2005).....	65
Tabella 4.1 – Range ottimale di umidità.....	71
Tabella 4.2 – Rapporto C/N di diverse matrici organiche (ARPA Veneto 2002).....	72
Tabella 4.3- Condizioni del substrato raccomandate per una buona gestione del processo di compostaggio (ANPA 2002). .....	73
Tabella 4.4 Sequenza delle fasi della digestione anaerobica e principali ceppi batterici (Malpei e Gardoni, 2008).....	77
Tabella 6.1 - Le analisi per la caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani.....	95
Tabella 6.2 - Le analisi per la caratterizzazione del materiale lavorato ..	101

Tabella 6.3. - Parametri chimico-fisici substrato organico (APAT, 2005)	104
Tabella 6.4 - Composizione elementare del substrato	104
Tabella 6.5 Limiti di qualità per la commercializzazione di ammendante a base di deiezioni animali (D.Lgs 75/2010)	105
Tabella 6.6 Limiti di qualità per la commercializzazione dell'ammendante compostato misto (D.Lgs 75/2010)	106
Tabella 6.7 Tipologie di rifiuti lavorati, codice CER corrispondente e percentuali in peso	112
Tabella 6.8 Limiti di concentrazione nell'eluato per l'accettabilità in discariche	121
Tabella 7.1 - Verifica della rispondenza ai requisiti stabiliti dai punti 1.1.3 ed 1.1.4 dell'Allegato 1 Suballegato1 all DM 5.2.98	128
Tabella 7.2 - Verifica presenza di inquinanti pericolosi	129
Tabella 7.3 - Verifica della rispondenza ai requisiti stabiliti dai punti 1.1.3 ed 1.1.4 dell'Allegato 1 Suballegato1 all. DM 5.2.98	130
Tabella 7.4 - Verifica presenza di inquinanti pericolosi	131
Tabella 7.5 Risultati del test di cessione condotto ai sensi del DM.5.2.98	132
Tabella 7.6 Risultati del test di ritenzione idrica	133
Tabella 7.7 Risultati analisi microbiologiche	137
Tabella 7.8 Risultati dei test di fitotossicità su <i>Lepidium Sativum</i>	138
Tabella 7.9 Limiti di qualità per la commercializzazione di ammendante a base di deiezioni animali (D.Lgs 75/2010)	139
Tabella 7.10 Composizione elementare del materiale	139
Tabella 7.11 Parametri di riferimento per la trattabilità biologica del materiale	139
Tabella 7.12 Limiti di qualità per la commercializzazione dell'ammendante compostato misto (D.Lgs 75/2010)	140
Tabella 7.13 Composizione merceologica della FUT	141
Tabella 7.14 Caratterizzazione chimico-fisica della FUT	142
Tabella 7.15 Metalli contenuti nella FUT e valori di letteratura	143
Tabella 7.16- Dati test di cessione FUT secondo il DM 27/09/2010	146



## SOMMARIO

Il progressivo aumento dei rifiuti, la variazione della loro composizione, peraltro molto diversificata a seconda delle abitudini di consumo delle popolazioni, contemporaneamente all'affermarsi di una diffusa coscienza di tutela ambientale ha accresciuto l'interesse tecnico in relazione all'implementazione di appropriate strategie di gestione dei rifiuti finalizzate alla minimizzazione della quantità e pericolosità degli stessi e all'individuazione di corrette modalità di trattamento e smaltimento, limitando l'impatto ambientale e valorizzando il recupero di materiali e di energia.

La realizzazione di un sistema integrato di gestione dei rifiuti solidi, in accordo a quanto previsto dalle normative di settore, mira a promuovere la valorizzazione dei rifiuti stessi come materiali recuperabili o come fonte di energia, riservando allo smaltimento in discarica un ruolo residuale rispetto alle diverse possibilità di trattamento finalizzate al recupero.

In questo contesto, la caratterizzazione dei materiali sottoposti ad attività di recupero costituisce una fase di estrema importanza, in ragione del potenziale rischio sanitario-ambientale connesso alla reintroduzione, nel ciclo della materia, di sostanze di scarto, talvolta potenzialmente pericolose.

Alla luce di tali problematiche, la ricerca ha inteso perseguire:

- l'identificazione di metodi innovativi per la valorizzazione dei rifiuti ai fini del recupero di materia;
- lo studio e l'implementazione delle più appropriate procedure di caratterizzazione per la minimizzazione del rischio associato ai prodotti delle stesse attività di recupero.

Attesa la specificità delle possibili attività di recupero in relazione alle caratteristiche merceologiche e chimico-fisiche del rifiuto solido, l'attività sperimentale è stata condotta in riferimento a due differenti matrici:

- il materiale cellulosico selezionato alla fonte; in particolare, è stata valutata la possibilità di impiego di rese invendute di giornale per la produzione di lettiere;

- 
- la frazione organica selezionata meccanicamente dal rifiuto solido urbano residuale da raccolta differenziata; in particolare è stata valutata la possibilità di impiego in attività di ripristino ambientale, dopo stabilizzazione aerobica, e la degradabilità biologica in condizioni anaerobiche per la produzione energia.

Il ricorso a nuove possibilità di valorizzazione per la carta suscita, infatti, crescente interesse in ambito industriale, in considerazione delle incerte prospettive caratterizzanti il mercato del macero.

Al contempo, il possibile utilizzo della frazione organica da selezione meccanica si configura come una delle tematiche di maggior rilievo in relazione al fatto che l'elevato contenuto di frazioni estranee, non biodegradabili, ne limita il recupero secondo le modalità previste per la frazione organica derivante da raccolta differenziata.

Il materiale celluloso, quindi, è stato sottoposto alla caratterizzazione chimico-fisica e, successivamente, si è provveduto a verificarne la compatibilità ambientale attraverso le procedure che, in Italia, sono stabilite dal Decreto Ministeriale 5/2/98, relativo al recupero di rifiuti non pericolosi in procedura semplificata.

I risultati delle determinazioni analitiche evidenziano che il materiale oggetto di studio risulta suscettibile di forme alternative di gestione ed è potenzialmente idoneo ad essere utilizzato come lettiera. La fase di caratterizzazione, in particolare, ha consentito di evidenziare come il contenuto di sostanze pericolose, tipicamente presenti nella carta grafica, sia tale per cui l'impiego del prodotto ottenuto comporta un rischio sanitario-ambientale ammissibile.

In particolare, le evidenze sperimentali hanno guidato la predisposizione di un brevetto depositato dall'azienda produttrice del rifiuto celluloso impiegato ai fini dell'attività di ricerca.

Analogamente a quanto illustrato per il materiale celluloso, la frazione organica da selezione meccanica è stata caratterizzata in riferimento ai principali parametri chimico-fisici.

La matrice è stata sottoposta ad un processo di stabilizzazione aerobica, condotto a scala pilota, in accordo alle specifiche di cui alla Delibera di Giunta della Regione Campania 426/2011. Inoltre, è stato verificato il potenziale di produzione di biogas in processi anaerobici, finalizzati al recupero contestuale di energia dal biogas e di materia dal digestato.

I risultati ottenuti dal processo di stabilizzazione aerobica in 21 giorni, riduzione dell'IRDp ad un valore inferiore a  $800 \text{ mg O}_2 \cdot \text{kg}_{\text{sv}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , portano a considerare la possibilità di impiegare il biostabilizzato

prodotto come in operazioni di ripristino ambientale, in accordo con il DGR 426/2011. Al contrario, il potenziale di produzione di biogas è risultato particolarmente esiguo, inferiore a 40 NL/Kg<sub>SSV</sub>, e tale da non rendere appetibile, sotto il profilo tecnico-economico, l'opzione del trattamento anaerobico.

L'attività di ricerca, dunque, oltre all'identificazioni di ipotesi innovative per il recupero di materia dai rifiuti, ha consentito di verificare l'importanza delle procedure di caratterizzazione del rifiuto.

Queste, infatti, rappresentano uno strumento privilegiato per l'identificazione delle più appropriate soluzioni di recupero e all'individuazione del potenziale rischio sanitario-ambientale connesso alla reintroduzione nel ciclo della materia di matrici di scarto.

---

## ABSTRACT

The enhancing waste productions, the change in its composition along with the widespread awareness of environmental issues have increased the technical interest towards the implementation of suitable waste management strategies. Aim of these strategies is the minimization of waste amount and hazardousness as well as the identification of correct treatment and disposal systems, reducing the environmental impact and enhancing the recovery of materials and energy.

The implementation of an integrated waste management system represents the most suitable option to enhance waste recovery, thus reducing landfill disposal.

In this context, the characterization of the materials subjected to recovery activities is a fundamental phase, because of the potential health and environmental risk connected to the reintroduction, in the cycle of matter, of waste substances, which are potentially harmful.

Into consideration of these problems, the research was aimed at:

- identifying innovative methods for material recovery from waste;
- studying and promoting the implementation of the most appropriate characterization procedures, in order to minimize the risk associated with the products of recovery activities.

According to the different characteristics of waste, the experimental activity was carried out with reference to two different matrixes:

- a source sorted cellulosic material;
- an organic fraction coming from the mechanical selection of unsorted waste.

The identification of non-conventional recovery solutions is, indeed, particularly interesting, for both cellulosic material and mechanically sorted organic waste. In the former case, the reason is related to the uncertain prospects of the pulp market, so that its use for litter production was proposed. On the other hand, the possible use of the mechanically selected organic fraction represents one of the most important issues due to its high content of impurities, which limits its recovery. For this matrix, the use as landfill daily cover material was proposed.

The cellulosic material, therefore, was submitted to the physic-chemical characterization. It was also characterized in order to assess its environmental compatibility according to the procedure that, in Italy, is established by Ministerial Decree 5/2/98.

The results of analytical tests showed that the studied material can be suitably used within different recovery processes and it can be valuably used for litter production. The characterization phase proved to be fundamental to determine the content of hazardous substances that are typically present in the graphic paper and can pose a risk to both health and environment.

In particular, the experimental evidences led to a patent, which has been recently developed by the company that provided the cellulosic waste.

As for the mechanical sorted organic fraction, it was characterized with reference to main physical-chemical as well as biological parameters.

The matrix was, then, subjected to an aerobic stabilization process, carried out on a pilot scale, according to Campania Region Resolution 426/2011. Furthermore, the biogas production potential was assessed, in order to evaluate the possible use of this substrate within anaerobic digestion processes.

Results show the effectiveness of aerobic stabilization process to ensure an adequate biological stabilization level (DRI<sub>p</sub> values below  $800 \text{ mg O}_2 \cdot \text{kg}_{\text{sv}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ), that its use as daily landfill cover material can be pursued. However, the potential for biogas production was particularly low (values below  $40 \text{ NL/Kg}_{\text{sv}}$ ), thus making anaerobic digestion processes not pursuable for its treatment.

---

## RINGRAZIAMENTI

Durante questo periodo della mia vita tanti sono stati gli eventi che si sono succeduti, grandi preoccupazioni, immense gioie e tante soddisfazioni, colgo l'occasione per ringraziare le persone che hanno condiviso con me questi momenti.

Un immenso grazie va alla mia famiglia, mio marito, le mie figlie e i miei genitori, che mi hanno permesso di arrivare a questa meta .

Ringrazio il prof. Rodolfo M. A. Napoli per la sua disponibilità e per gli insegnamenti di questi anni.

Ringrazio il prof. Vincenzo Belgiorno per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso e per avermi entusiasmata utilizzando sempre le giuste parole.

Un “grazie di cuore” ad Alessandra Cesaro, sorprendente scoperta di questi anni di SEED, per la sua amicizia e il suo prezioso aiuto.

Un grazie a Luigi Rizzo per i gustosi scambi di opinione e i suoi continui spunti riflessivi.

Un “grazie speciale” al caro Paolo Napodano, nonostante la sua suscettibilità, è stato un compagno di avventure prezioso.

Grazie a Lara Russo che ha sempre creduto nelle mie capacità, molto più di me.

Un “grazie di gruppo” a Stefano, Davide, Roberta, Sabrina, Antonino, Genny, Laura, Alessandra M., Fabiola, Milena, Daniele, Mariangela Tiziano, Vincenzo, Dina per il loro affetto e la compagnia nel corso degli anni al SEED.

*A tutti tanto 8imismo!*

## ABOUT THE AUTHOR

**Anna Farina** nasce a Salerno il 17/09/75. Consegue la laurea in Chimica presso l'Università di Salerno nel 2003. Dopo la laurea, collabora con il dipartimento di Chimica ad attività di monitoraggio ambientale. Nel 2009 viene ammessa al corso di dottorato in ricerca in Ingegneria Civile per l'Ambiente e il Territorio presso l'Università di Salerno. L'attività di ricerca è incentrata su problematiche concernenti la gestione dei rifiuti solidi, con particolare riferimento all'identificazione di metodi innovativi per la valorizzazione dei prodotti provenienti da attività di recupero. Attualmente collabora alle iniziative promosse dal SEED (Sanitary Environmental Engineering Division).

**Anna Farina** was born in Salerno on 17/09/75. She got her Master Degree in Chemistry in 2003, at the Department of Chemistry of the University of Salerno (Italy). She collaborated with the Department of Chemistry, working on research projects and several activities dealing with the environmental monitoring. In 2009 she was admitted to the Ph.D. course at the Department of Civil Engineering, University of Salerno. Her research activity is in the field of waste management, with particular reference to the identification of innovative solutions for the recovery of the matter from waste management cycle. At the moment, she is involved in the initiatives promoted by the Sanitary Environmental Engineering Division (SEED).

# 1 INTRODUZIONE

Le problematiche connesse alla produzione dei rifiuti da tutte le attività dell'uomo hanno assunto negli ultimi decenni proporzioni sempre maggiori in relazione al miglioramento delle condizioni economiche, al veloce progredire dello sviluppo industriale, all'incremento della popolazione e delle aree urbane.

In particolare, lo sviluppo economico-sociale, ha provocato un aumento della produzione dei rifiuti e una diversificazione merceologica degli stessi. Si pensi, ad esempio, al comune utilizzo delle diverse materie plastiche, che ha portato all'affermarsi di una diffusa coscienza di tutela ambientale accrescendo l'interesse tecnico in relazione all'implementazione di appropriate strategie di gestione dei rifiuti finalizzate alla minimizzazione della quantità e pericolosità degli stessi e all'individuazione di corrette modalità di trattamento e smaltimento, limitando l'impatto ambientale e valorizzando il recupero di materiali e di energia.

Il corretto approccio di gestione dei rifiuti vede nella gestione integrata, che contempla il concorso di più modalità operative e il coinvolgimento del cittadino, la migliore strategia nel rispetto delle quattro priorità già introdotte dal Decreto Ronchi: Riduzione, Riutilizzo, Riciclo e Recupero. La realizzazione di un sistema integrato di gestione dei rifiuti mira a promuovere la valorizzazione dei rifiuti come materiali recuperabili o come fonte di energia e il ricorso allo smaltimento in discarica in via residuale rispetto alle diverse possibilità di trattamento finalizzate al recupero.

Anche per quanto attiene il quadro normativo nazionale, il D. Lgs. 152/2006 e ss. mm. che recepisce le Direttive Europee di settore, e disciplina, alla Parte IV, la gestione dei rifiuti, ne incentiva la riduzione, fissando gli obiettivi minimi di raccolta differenziata che consentano una maggiore efficienza delle filiere di riciclo.

In un sistema di gestione dei rifiuti incentrato sul recupero di materia è di fondamentale importanza eseguire in modo più completo possibile la caratterizzazione dei prodotti sottoposti alle attività di riciclo.

Negli ultimi anni si sta sviluppando sempre più l'idea per cui bisogna prendere in considerazione il fatto che i prodotti sottoposti ad attività di recupero potrebbero presentare un certo grado di tossicità proveniente dalle materie prime che vengono utilizzate durante il processo di riciclaggio.

## 1.1 OBIETTIVI

Alla luce delle problematiche esistenti sulla gestione dei rifiuti, l'attività di dottorato ha avuto come obiettivo la ricerca di metodi innovativi per il recupero di materia e di energia dal ciclo integrato dei rifiuti.

Inoltre, è importante evidenziare che la valorizzazione di un rifiuto volta al recupero di materia, è strettamente connessa alla tipologia di rifiuto considerata: è evidente come una notevole differenza sussista tra materiali secchi (carta, plastica, ...) e umidi (rifiuto organico).

L'attività sperimentale ha avuto, quindi, come oggetto:

- i materiali a base cellulosica selezionati alla fonte;
- la frazione organica derivante da selezione meccanica dei rifiuti urbani residuali da raccolta differenziata.

L'identificazione di soluzioni di recupero non convenzionali rappresenta, infatti, per entrambe le matrici, un aspetto di particolare rilievo nel panorama tecnico-scientifico.

Il ricorso a nuove possibilità di valorizzazione per la carta suscita, infatti, crescente interesse in ambito industriale, in considerazione delle incerte prospettive caratterizzanti il mercato del macero. Nell'ambito del presente studio, in particolare, sulla base dell'analisi della letteratura scientifica, è stata valutata la possibilità di impiego di rese invendute di giornale per la produzione di lettiera.

Al contempo, il possibile utilizzo della frazione organica da selezione meccanica si configura come una delle tematiche di maggior rilievo in relazione al fatto che l'elevato contenuto di frazioni estranee, non biodegradabili, ne limita il recupero secondo le modalità previste per la frazione organica derivante da raccolta differenziata.

Per questa matrice, che si configura come uno stabilizzato pre-discarica, è stato previsto il trattamento per l'impiego come materiale di ricoprimento giornaliero di discariche, in accordo agli indirizzi della Delibera di Giunta della Regione Campania 426/2011. Inoltre, è stato

stimato il potenziale di produzione di biogas di questa matrice, al fine di valutare la fattibilità utilizzo nell'ambito di processi anaerobici per la produzione di biogas.

L'analisi della letteratura scientifica e del contesto normativo nazionale e internazionale, tuttavia, ha evidenziato una scarsa chiarezza nella definizione dei rischi connessi all'impiego di tali rifiuti nell'ambito di processi volti al recupero di materia.

A tal fine, la caratterizzazione del rifiuto assume un ruolo fondamentale e la sistematizzazione delle necessità analitiche rispetto all'identificazione dei parametri per la tutela ambientale, per la funzionalità e per destinazione d'uso risulta di fondamentale importanza.

## **1.2 STRUTTURA DELL'ELABORATO DI TESI**

L'elaborato di tesi è stato articolato in 8 capitoli.

Dopo una prima introduzione, nel Capitolo 2 è stata delineata la caratterizzazione dei rifiuti urbani, indispensabile per un corretto funzionamento di un sistema di gestione dei rifiuti. Successivamente, sono stati identificati i tratti principali di un sistema integrato di gestione dei rifiuti, caratterizzando quelle che sono le frazioni recuperabili ed evidenziando, con riferimento alla frazione umida del rifiuto solido urbano, le principali differenze riconducibili ai sistemi di selezione. Particolare attenzione è stata, ovviamente, rivolta agli aspetti di tossicità delle frazioni recuperabili dei rifiuti.

Il terzo capitolo è incentrato sul recupero del materiale cellulosico. In particolare, dopo aver descritto le tecnologie convenzionali per il recupero del materiale cellulosico derivante da raccolta differenziata, ci si è dedicati alla descrizione dell'opportunità di impiego di tale materiale per la produzione di lettiere per animali domestici di piccola taglia.

Nel quarto capitolo, invece, sono illustrati i trattamenti a cui può essere sottoposta la frazione organica dei rifiuti urbani derivanti sia da raccolta differenziata che da selezione meccanica. Emerge, ovviamente, un più diffuso impiego dei processi biologici, in relazione alle caratteristiche di fermentescibilità di questa matrice che ne limitano l'utilizzo in tipologie di processo differenti.

Il quinto capitolo inquadra l'attività sperimentale nel suo complesso ed introduce il capitolo successivo, dedicato alla descrizione dei materiali e

delle procedure eseguite per il raggiungimento degli obiettivi dell'attività sperimentale stessa.

Il Capitolo 6 è stato, quindi, diviso in due parti:

- una parte dedicata alla caratterizzazione chimico-fisica e prestazionale dei materiali cellulosici per la produzione di lettiere, nonché alle procedure di verifica della trattabilità biologica del materiale esausto;
- la seconda parte in cui è stata descritta l'attività sperimentale condotta sulla frazione umida, descrivendo le metodiche di caratterizzazione chimico-fisica e biologica, nonché il set up sperimentale ed analitico per i test aerobici ed anaerobici realizzati.

I risultati dell'attività sono discussi nel settimo capitolo, anche alla luce di analoghe esperienze di letteratura ed indirizzano l'ultimo capitolo, dedicato alle conclusioni.

## 2 LA CARATTERIZZAZIONE DEI RIFIUTI

La problematica dei rifiuti negli ultimi anni è diventata uno dei fattori di maggiore pressione antropica sul territorio. Cercare, oggi, la migliore definizione di rifiuto, al di là delle definizioni tecniche e/o normative, risulta cosa molto difficile. Si pensi, ad esempio, ad oggetti che vengono usati normalmente nella vita di tutti i giorni: una busta della spesa, il cartone della pizza, il tappetino di asfalto di una strada. La plastica, la carta, il vetro sono spesso realizzati con materiali riciclati, oggetti che per un lasso di tempo sono stati considerati rifiuti, in quanto non risultavano più utili allo scopo per cui erano stati originariamente concepiti e per questo gettati. Dopo una serie di trasformazioni, però, più o meno distruttive, gli stessi rifiuti sono tornati ad avere una nuova utilità.

È chiaro che il processo sopra descritto non è semplice da applicare, né tanto meno può essere esteso a tutti gli oggetti che ci circondano e che noi utilizziamo o produciamo, però è un sintomo di come la nostra società “consumistica” sia in grado di riutilizzare e riciclare.

Nel corso degli anni si sta constatando una crescente consapevolezza dell'insufficienza delle risorse naturali, che impone di modificare i comportamenti sociali orientandoli verso il risparmio. In particolare, la raccolta differenziata, su cui si sta puntando negli ultimi anni, non potrà mai da sola risolvere il problema dei rifiuti; l'ideale sarebbe diminuire la produzione stessa dei rifiuti, cercando di sfruttare i diversi materiali di scarto nello stesso ciclo produttivo, o in uno affine, ricorrendo al minor numero possibile di trasformazioni.

In Italia la questione si è posta in termini problematici solo a partire dagli anni settanta; le metodologie di gestione e smaltimento adottate, però, sono state piuttosto disomogenee ed hanno tenuto in considerazione solo le motivazioni di igiene pubblica.

Oggi si guarda al futuro pensando al rifiuto come ad una risorsa. L'uso efficiente delle risorse significa ridurre le quantità prodotte a “monte” e recuperare e riutilizzare a “valle” tutte quelle risorse che vengono considerati rifiuti.

Un importante passo è la realizzazione di un sistema integrato di gestione dei rifiuti che si propone come obiettivo la valorizzazione dei rifiuti

come materiali recuperabili o come fonte di energia e il ricorso allo smaltimento in discarica solo per le frazioni non ulteriormente valorizzabili.

È opportuno evidenziare che, nell'ambito di un completo sistema di gestione dei rifiuti da avviare a recupero, risulta fondamentale la conoscenza qualitativa di un rifiuto sia ai fini della sua classificazione tecnico - amministrativa, sia per la definizione delle soluzioni di recupero e trattamento/smaltimento (Franklin, 1986).

A tal fine, il presente capitolo è incentrato sulla caratterizzazione del rifiuto solido, con particolare riferimento a quello di origine domestica ed alle sue potenzialità di recupero, anche in relazione alla tossicità.

## 2.1 ORIGINE E TIPOLOGIE

La conoscenza dell'origine e della tipologia dei rifiuti solidi, insieme ai dati sulla loro composizione, è alla base del corretto funzionamento di un sistema di gestione dei rifiuti.

La diversificazione delle caratteristiche dei rifiuti solidi è strettamente collegata all'origine degli stessi rifiuti. Sebbene possano essere sviluppate numerose classificazioni in base all'origine, è possibile classificare i rifiuti in tre distinte categorie (Sirini et al., 2010, Tchobanoglous et al., 1997):

- 1) **Rifiuti solidi urbani (RSU)**. Comprendono i rifiuti prodotti in insediamenti civili ed in aree pubbliche sia di natura organica che inorganica. In genere, la frazione organica di tali rifiuti è costituita da scarti alimentari, carta e cartoni di vario tipo, plastiche varie, tessuti, gomma, pellame, legno e residui dalle attività di giardinaggio. La frazione inorganica è principalmente costituita da vetro, stoviglie, lattine in alluminio, metalli ferrosi e non ferrosi. Vi sono, poi, tipologie di rifiuti derivanti da attività commerciali, artigianali ed industriali che hanno caratteristiche simili ai RSU o loro componenti (ad esempio materiali di imballaggio, ritagli di tessuti, gomma, scarti dell'industria alimentare, scarti di legno, scarti di materiali di arredamento, etc.). Sono detti "Rifiuti assimilabili agli urbani" e come tali vengono di norma gestiti attraverso gli stessi circuiti di raccolta, trattamento e smaltimento.
- 2) **Rifiuti speciali (RS)**. Il carattere *speciale* di un rifiuto deriva sostanzialmente dall'origine: con il termine speciale vengono indicati,

infatti, i rifiuti diversi da quelli prodotti dalle civili abitazioni. Essi comprendono soprattutto la vasta categoria dei rifiuti industriali, artigianali, agricoli e commerciali. In aggiunta, sono considerati "speciali": i rifiuti composti da materiali da costruzione, demolizione e scavo; i veicoli e macchinari obsoleti; i rifiuti prodotti da ospedali e case di cura; i residui derivanti dal trattamento di rifiuti solidi urbani (scorie di incenerimento, residui degli impianti di riciclaggio) e dal trattamento delle acque reflue civili (materiale grigliato e fanghi di risulta).

- 3) **Rifiuti pericolosi (RP)**. Comprendono rifiuti che rappresentano un pericolo immediato, o nel lungo termine, per la salute dell'uomo e la vita animale e vegetale. Secondo il DPR 915/1982, questi rifiuti erano definiti "rifiuti tossici- nocivi", il decreto legislativo n. 22 del 1997, decreto Ronchi, introduce la dizione di "rifiuti pericolosi" che appare più appropriata anche in rapporto alla denominazione "Hazardous Wastes" attribuita dalla Comunità Europea e dalla letteratura scientifica internazionale. Si tratta in prevalenza di rifiuti di origine industriale i quali presentano una o più delle seguenti caratteristiche di pericolo: (1) infiammabilità, (2) tossicità nocività irritabilità, (3) corrosività, (4) cancerogenità, (5) teratogenità, (6) mutagenicità, (7) infettabilità, (8) reattività, (9) esplosività.

Ai sensi della vigente normativa nazionale (D.Lgs. 152/06) sono pericolosi i rifiuti non domestici che nell'elenco dei rifiuti di cui all'Allegato D alla Parte Quarta del D.Lgs. 152/2006, ossia nel comunemente detto CER, sono contrassegnati con un asterisco (art. 184, comma 5 del D.Lgs. 152/2006). Se però in tale Allegato, il rifiuto è identificato come pericoloso mediante riferimento specifico o generico a sostanze pericolose e come non pericoloso in quanto diverso da quello pericoloso ("voce a specchio"), esso è classificato come pericoloso solo se tali sostanze raggiungono determinate concentrazioni.

### 2.1.1 Composizione merceologica

La composizione merceologica dei rifiuti solidi rappresenta un aspetto fondamentale per la descrizione quanti-qualitativa delle diverse frazioni che compongono il rifiuto; la relativa distribuzione delle diverse componenti viene, di norma, rappresentata come percentuale in peso umido.

La conoscenza della composizione merceologica dei rifiuti urbani è fondamentale per programmare ed ottimizzare l'organizzazione della loro gestione: dalle modalità di raccolta e conferimento, alla quantificazione dei materiali potenzialmente riutilizzabili, alle tecnologie più idonee per il trattamento e lo smaltimento finale, alla verifica dei flussi in ingresso ed in uscita dagli impianti di trattamento.

La composizione del rifiuto urbano netto, vale a dire quello conferito nei cassonetti per il materiale indifferenziato, è estremamente variabile, e fotografa una situazione temporale ben definita: l'attivazione di nuove raccolte differenziate e/o l'aumento della resa delle RD già in essere che determinano importanti cambiamenti quali-quantitativi del RU indifferenziato.

Per valutare, infatti, le caratteristiche qualitative dei rifiuti, ad oggi, si utilizzano le analisi merceologiche.

Nel corso degli ultimi 30 anni, le metodiche a livello nazionale si sono moltiplicate e sono stati fatti numerosi studi per testare l'affidabilità e la riproducibilità dei risultati ottenuti attraverso questo metodo di indagine, verificando le specifiche da applicare per tutte le fasi operative (Mambretti et al., 2007).

Gli studi hanno portato alla definizione di alcuni requisiti minimi. In funzione del livello di dettaglio richiesto, della natura, della complessità e dell'ampiezza demografica dell'ambito territoriale che si intende studiare, nonché della matrice oggetto di studio e delle indicazioni che si intende recepire, esistono differenti metodiche, che si discostano per una serie di passaggi, ma che hanno tutte in comune l'estrazione di un campione rappresentativo dall'universo di rifiuti che si intende valutare e la successiva cernita manuale con pesatura.

Le differenze tra i vari metodi riguardano sostanzialmente i seguenti aspetti:

- modalità di campionamento territoriale, ovvero il mezzo utilizzato (compattatore o veicolo a vasca), e modalità di scelta dei sottocampioni;
- peso del campione analizzato che va da un minimo di 30 kg fino a circa 500 kg nel caso di realtà complesse;
- operazione di vagliatura, che può non venire richiesta. In tal senso le metodiche indicano misure differenti riferite alla luce dei vagli utilizzabili e modalità diverse di separazione (vaglio rotante, vaglio piano, vibrovaglio);

- numero, tipo e nomenclatura delle classi merceologiche, che vanno da un minimo di due fino a varie decine nel caso di metodiche che intendano considerare un ampio numero di sottocategorie;
- accorpamento dei dati raccolti e successiva elaborazione.

Le principali metodiche ad oggi applicate, in Italia e in altri paesi europei, sono varie, come riporta la Tabella 2.1:

**Tabella 2.1-Metodiche di analisi merceologica (ANPA, 2000)**

<b>Metodiche</b>	<b>Classi merceologiche</b>
<b>CNR (Centro Nazionale Ricerche)</b>	Sottovaglio, materiale celluloso, materiale plastico, metalli, inerti, materiali organici.
<b>IPLA (Istituto per le piante da Legno e l'Ambiente)</b>	Organico, sottovaglio, carta e cartone, legno, plastic, vetro, altri inerti, metalli, alluminio, tessili, pelli, cuoio, R.U.P., altro.
<b>Ferrari, 1995</b>	Sottovaglio, scarti di mensa, carta e cartone, scarti verdi e legno, plastica leggera, plastica pesante, vetro e inerti, metalli, tessili, cuoio e gomme, vari, ingombranti, pannolini.
<b>Morselli, 1995</b>	Sostanza organica in quattro categorie e riducendo vegetali (pane, sfarinati cotti e crudi, residui carni, grassi, prodotti caseari, cartae cartone, residui legnosi, stracci, cuoio e pelli, lattami, materiali ferrosi, metallici non ferrosi, vetro, altri inerti, materiali amorfi putrescibili, amorfi non putrescibili, gomme, plastiche.
<b>Warren Spring Laboratory</b>	Identifica 33 classi merceologiche.
<b>ERRA (European Recovery and Recycling Association)</b>	Classi merceologiche principali (plastica, metalli, inerti, ecc.), oggetti raccolti (contenitori, lattine, lamine, ecc.) il materiale (PVC, acciaio, alluminio, ecc.) e la funzione d'uso del prodotto (contenitore per liquidi, ecc.)
<b>MODECOM dell'A.D.E.M.E. (dell'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)</b>	Tre frazioni granulometriche (frazione grossa, media e fine), la selezione in categorie (rifiuti putrescibili, carta, cartone, poliaccoppiati, tessili, tessili di origine sanitaria, plastica, combustibili non classificati, vetro, metallo, incombustibili non classificati, rifiuti speciali, frazione fine < 20 mm) e sottocategorie caratterizzate da un maggiore dettaglio.
<b>A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials)</b>	Sottovaglio, scarti di mensa, carta e cartone, verde di città, plastica leggera, plastica pesante, tessili, vetro, cocci ed inerti pesanti, metalli, ingombranti, pannolini, cuoio, pelli, legno, ecc.

<b>Paesi dell'area O.C.S.E. (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico)</b>	Carta e cartone, materiali plastici, vetro, metallo, sostanza organica, altro.
<b>Residential M.S.W. adottato in U.S.A. (Residential Municipal Solid Waste)</b>	Organici: rifiuti di cucina, carta, cartone, plastica, tessili, gomma, pelle, rifiuti di giardino, legno, altro; inorganici: vetro, contenitori per cibo in banda stagnata, alluminio, altri metalli, terra, cenere ecc.
<b>Valentini, 1998</b>	Tipologie di rifiuto (livello 1a: rifiuti prodotti nelle abitazioni, rifiuti ingombranti, RUP, rifiuti assimilabili; livello 1b: rifiuti domestici, imballaggi, pile, farmaci, contenitori T e/o F) su cui effettuare la suddivisione nelle principali classi merceologiche (livello 2: carta e cartoni, tessili e legno, plastica, metalli, inerti, frazione organica, sottovaglio) ed ulteriori suddivisioni successive (livello 3, 4, 5) che permettono di definire i materiali componenti le singole categorie.
<b>DRGV 568/2005</b>	Focalizza l'attenzione sulla frazione organica.

In Italia, la tecnica di analisi merceologica utilizzata è la metodica IRSA-CNR (ANPA, 2000), che propone l'identificazione all'interno del campione (circa 200 Kg) sottoposto a selezione manuale, in sei classi merceologiche (carta, tessili e legno, plastiche e gomma, metalli, vetri, ceramiche e pietre, sostanza organica, sottovaglio < 20 mm). A monte di tutto questo, vi è l'accantonamento degli ingombranti, successivamente pesati e selezionati secondo le categorie di appartenenza. Come indicato in precedenza, ai fini dell'analisi merceologica, è necessario arrivare a un campione che presenti un peso variabile tra 100 e 200 Kg; per questo motivo, dai quantitativi iniziali, che dipendono dal numero di abitanti come riporta la Tabella 2.2 occorre enucleare un campione di minori dimensioni, mantenendo il carattere di rappresentatività di questo.

**Tabella 2.2- Dimensione del campione per l'analisi merceologica in funzione del numero di abitanti (Sirini et al., 2010)**

<b>Abitazioni, N.</b>	<b>Dimensioni minime del campione [1.000 Kg]</b>
Fino a 1.000	0,5
Fino a 10.000	1
Fino a 50.000	5
Oltre 50.000	12,5

## 2.2 IL SISTEMA INTEGRATO DI GESTIONE DEI RIFIUTI SOLIDI URBANI

Il decreto Ronchi (D.Lgs. 22/1997 e ss.mm.ii.), recependo le direttive della comunità europea, ha impresso un cambiamento rilevante nelle impostazioni delle prestazioni dei servizi di igiene urbana ponendo le premesse per l'avvio di un processo di ristrutturazione del settore dei rifiuti urbani.

Nella legislazione dei Paesi membri dell'UE, risulta prioritaria l'azione di minimizzazione dei rifiuti, secondo una gerarchia di opzioni che prevede prima la prevenzione e dopo il riciclo.

La definizione di minimizzazione dei rifiuti, intesa come riduzione della loro quantità e pericolosità per l'ambiente, comprende le seguenti azioni (Figura 2.1): prevenzione, riutilizzo del prodotto e riciclaggio.



Figura 2.1 Gerarchia dei rifiuti (Cipriano, 2011).

I principi che vengono indicati nei programmi della comunità europea per la gestione dei rifiuti sono (D'Amico et al. 2007):

- principio di *autosufficienza*: autosufficienza nello smaltimento dei rifiuti non pericolosi in ambiti territoriali ottimali;

- principio di *prossimità* in materia di smaltimento: riduzione della movimentazione dei rifiuti all'interno dell'ambito territoriale di riferimento ;
- principio di *responsabilità condivisa*: ripartizione delle responsabilità e delle competenze fra tutti i soggetti coinvolti nel ciclo di vita dei prodotti;
- principio di *economicità della gestione*: copertura integrale dei costi del servizio attraverso l'applicazione di un regime tariffario basato sul meccanismo del price cap.

Pensare di avviare al riciclaggio il 100% del rifiuto prodotto, considerando l'attuale composizione dei materiali presenti nello stesso, non è realisticamente perseguibile. Molto materiale presente nei rifiuti, infatti, è difficilmente recuperabile.

La gestione dei rifiuti è stata sempre considerata, nell'ambito dei servizi di pubblica utilità, un'attività di carattere residuale con finalità principali di igiene del territorio e di allontanamento dei rifiuti prodotti dai centri urbani destinando tali quantitativi allo smaltimento finale del *rifiuto tal quale* nelle discariche.

Solo di recente la gestione del ciclo dei RU è affrontata in un'ottica industriale ed integrata, nell'ambito della quale i principi di efficienza, efficacia ed economicità devono necessariamente convivere con le decisioni di politica ambientale e la caratterizzazione di servizio di pubblica utilità.

Attualmente, la destinazione dei rifiuti prodotti complessivamente in Italia è rappresentata nel grafico di Figura 2.2, dove si riporta la ripartizione percentuale delle operazioni di recupero/smaltimento, rispetto al totale dei rifiuti urbani gestiti nell'anno 2012.

L'analisi dei dati, relativi al 2012, evidenzia come il ricorso alla discarica assume a tutt'oggi un ruolo prevalente.

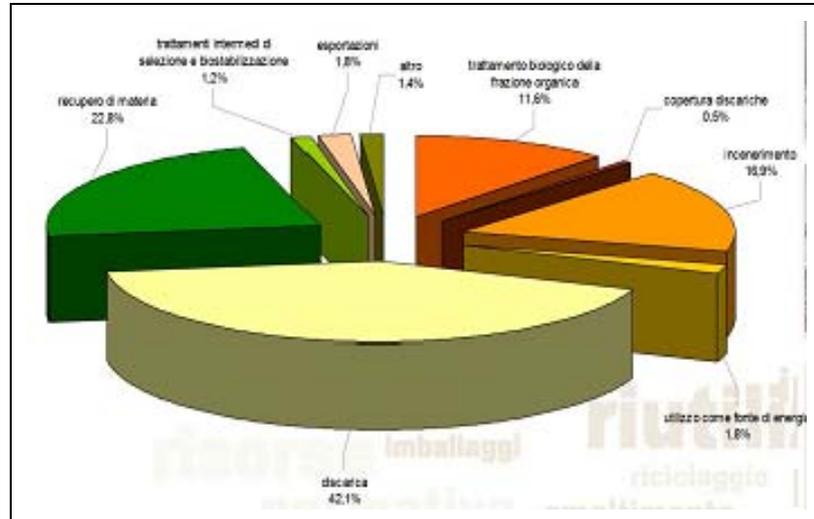


Figura 2.2 Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani, anno 2012 (ISPRA, 2013)

La filiera ottimale del trattamento dei RU si dovrebbe articolare come evidenziato in Figura 2.3, tra i diversi processi di raccolta, trattamento/separazione, recupero di materia ed energia, smaltimento finale.

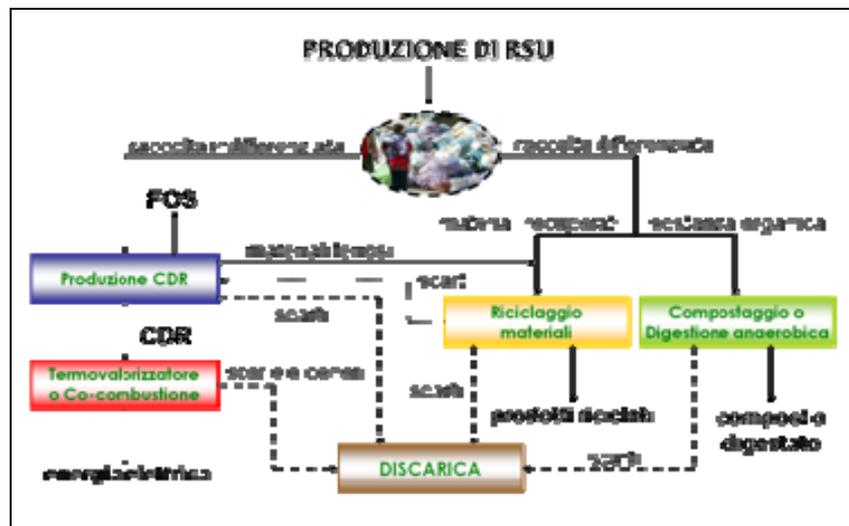


Figura 2.3 Il sistema integrato di gestione dei rifiuti solidi urbani.

I processi di raccolta comprendono tutte le attività di intercettazione dei RU prodotti e si distinguono in:

- *raccolta indifferenziata*, comprende l'intercettazione indistinta dei rifiuti conferiti dagli utenti mediante l'utilizzo di attrezzature specifiche e l'attività di pulizia delle strade;
- *raccolta differenziata*, di frazioni merceologiche omogenee presenti nei RU, destinate al riutilizzo, riciclaggio e al recupero di materia.

Come schematizzato in Figura 2.4, i rifiuti raccolti in modo indifferenziato vengono avviati agli impianti di trattamento, finalizzati al recupero di energia e, quindi, allo smaltimento finale (D'Amico et al. 2007).

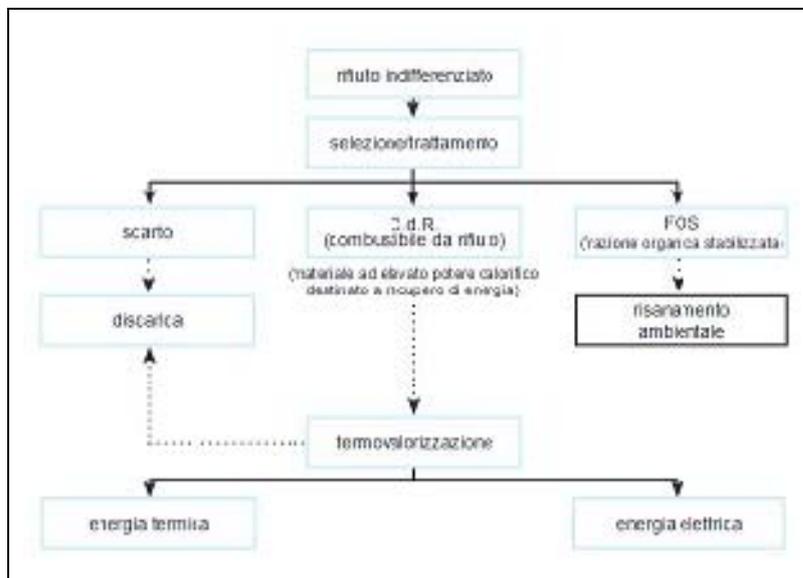


Figura 2.4 Ciclo della raccolta indifferenziata (D'Amico et al. 2007)

Al contrario, i rifiuti raccolti in modo differenziato vengono destinati al mercato per il reimpiego nei processi produttivi, direttamente o dopo selezione e valorizzazione in appositi impianti (Figura 2.5).

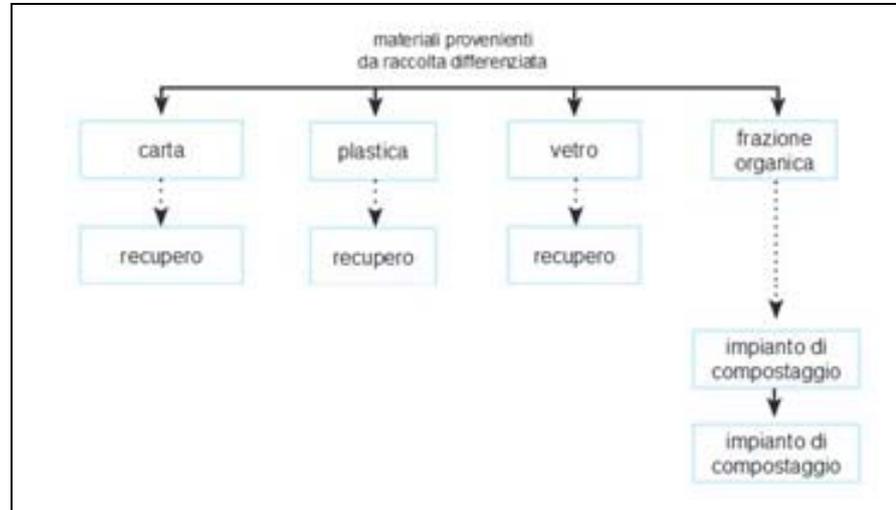


Figura 2.5 Ciclo della raccolta differenziata (D'Amico et al. 2007)

Il corretto approccio di gestione dei rifiuti vede nella gestione integrata, che contempla il concorso di più modalità operative e la collaborazione di tutti, la migliore strategia e nel rispetto delle priorità di gestione indicate dalla normativa vigente, l'enucleazione del processo da adottare:

- *riduzione*: minore produzione di rifiuti all'origine;
- *riutilizzo*: il prodotto va utilizzato più volte così da diminuire il bisogno di nuovo;
- *riciclo*: il materiale che non serve più al suo scopo viene trasformato per essere utile ad un altro;
- *recupero*: valorizzazione del rifiuto per ricavare materia seconda o energia.

A tal fine, la raccolta differenziata rappresenta lo strumento privilegiato di valorizzazione del rifiuto sin dalla fase di intercettazione (Muller, 2013; Sidique et al., 2010). Tuttavia oltre a garantire la selezione dei rifiuti urbani alla fonte, è necessario prevedere la valorizzazione delle frazioni che compongono il rifiuto residuale da raccolta differenziata, attraverso appositi sistemi di selezione.

### 2.2.1 I sistemi di selezione meccanica

Gli impianti di trattamento meccanico-biologico (TMB) sono in prevalenza impianti in cui si realizza il trattamento dei rifiuti indifferenziati, finalizzati a:

- allontanare la frazione di materiali ancora recuperabili, principalmente ferrosi;
- ottimizzare le caratteristiche del rifiuto a scopi energetici.

Il trattamento meccanico biologico in Italia ha interessato, nel 2011, circa 9,2 milioni di tonnellate di rifiuti urbani (pari al 29,2% di quelli prodotti) e d è stato diffusamente utilizzato come forma di pretrattamento prima dello smaltimento in discarica o dell'incenerimento con lo scopo, da una parte di migliorare la stabilità biologica dei rifiuti e ridurre l'umidità e il volume, dall'altra di incrementare il loro potere calorifico per rendere più efficiente il processo di combustione.

Gli impianti di selezione in grado di produrre questo materiale possono essere suddivisi essenzialmente in tre categorie (CITEC, 2000):

- impianti di tipo semplificato
- impianti mediamente complessi
- impianti complessi

I primi sono impianti semplici, costituiti essenzialmente da un tritatore primario (rompisacchi) e da un vaglio, normalmente un vaglio rotante unico, (con diametro dei fori da 50 a 100 mm) ed un deferrizzatore. Da questi impianti si ottengono tre flussi:

- un sovrvallo, costituito essenzialmente da frazioni secche (carta, plastica e poca presenza di materiali putrescibili) da inviare a termovalorizzatore senza altri trattamenti;
- una frazione organica (sottovaglio) da destinarsi a trattamenti biologici, preferibilmente dopo una ulteriore raffinazione;
- un flusso di recupero di materiali ferrosi (Cecchi et al., 2003).

Gli impianti mediamente complessi sono costituiti da una sequenza di operazioni più complessa che prevede almeno uno stadio di riduzione della pezzatura, una deferrizzazione, più operazioni di vagliatura.

Impianti con questa concezione sono in grado di produrre un sovrvallo da inviare a termovalorizzatore o discarica, una frazione organica proveniente da flussi intermedi di vagliatura da inviare a trattamenti biologici ed in seguito da utilizzare come materiale di copertura di discariche, un sottovaglio simile a quello ottenibile con gli impianti di

tipo semplificato ed infine un recupero di materiali ferrosi da inviare a riciclaggio. (Cecchi et al., 2003)

Infine, gli impianti complessi prevedono una linea di selezione completa, quindi:

- riduzione di pezzatura;
- deferrizzazione;
- vagli a più stadi;
- trituratori della frazione secca;
- pellettizzatrici per la produzione di CDR in pellets.

I prodotti di queste linee sono ovviamente più raffinati, e quindi la frazione organica ottenuta in questo modo si presta maggiormente a valorizzazione attraverso processi biologici (Cecchi et al., 2003).

In Figura 2.6 si schematizza il funzionamento di un impianto di selezione di tipo complesso.

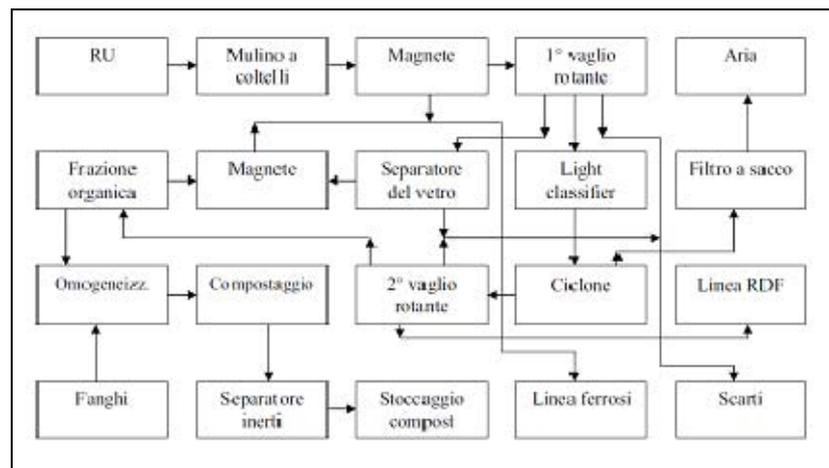


Figura 2.6 Schema di funzionamento di un impianto di selezione complesso a servizio della produzione di compost (Cecchi et al., 2003)

### 2.3 LE FRAZIONI DESTINATE AL RECUPERO DI MATERIA

Conoscere le frazioni che possono essere recuperate e riciclate assume importanza ai fini dello studio della produzione dei rifiuti e delle tecniche di separazione.

I rifiuti costituiscono, infatti, un'enorme riserva di risorse che, se opportunamente gestita e valorizzata, può garantire un

approvvigionamento sostenibile e continuo negli anni di materiali ed energia.

L'industria legata ai rifiuti è stata tra le più floride negli ultimi decenni e, indubbiamente, tra quelle con il fatturato più rilevante in campo ambientale. Sebbene possa sembrare una contraddizione, i rifiuti rappresentano, attualmente, una delle maggiori opportunità di crescita sostenibile per il sistema Europa e per il nostro Paese, carente di risorse primarie.

In Italia, il riferimento normativo vigente in materia ambientale (D.Lgs. 152/2006), all'art. 183 della Parte IV, definisce il riciclaggio come “qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini; include il trattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento”. In particolare, al fine di promuovere il riciclaggio di alta qualità e di soddisfare i necessari criteri qualitativi per i diversi settori del riciclaggio, il suddetto decreto prevede:

- l'attivazione, entro il 2015, della raccolta differenziata almeno per frazioni quali la carta, metalli, plastica e vetro, e ove possibile, per il legno;
- l'adozione, entro il 2020, di misure atte ad incrementare la preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio di rifiuti quali, carta, metalli, plastica e vetro provenienti dai nuclei domestici almeno al 50% in termini di peso.

Risulta opportuno evidenziare che la normativa prevede la possibilità che i materiali perdano la qualifica di rifiuto. Ai sensi di quanto sancito dall'art.184-ter, infatti, un rifiuto cessa di essere tale quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero, di riciclaggio, di riutilizzo che soddisfi dei criteri particolari da adottare nel rispetto di alcune condizioni

- a) la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici;
- b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;
- c) la sostanza o l'oggetto rispetta la normativa;
- d) l'utilizzo di questa, non rechi impatti negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

I metodi di recupero e gli standard di qualità da ottenere saranno fissati con decreto ministeriale. Nelle more dell'emanazione di tali decreti si fa

riferimento al DM 5 febbraio 1998 (per i rifiuti non pericolosi) e al D.Lgs 161/2002 (per i rifiuti pericolosi). In particolare il DM 5.2.98 identifica le caratteristiche qualitative dei materiali recuperati, non costituenti più rifiuto, un tempo inquadrati, sotto il profilo come *materie prime secondarie*, oggi la normativa vigente li definisce *sottoprodotti*.

Alla categoria dei “non rifiuti”, quindi, appartengono i sottoprodotti, (art.184-bis), ossia i prodotti dell'attività dell'impresa che, pur non costituendo l'oggetto dell'attività principale, scaturiscono in via continuativa dal processo industriale dell'impresa stessa e sono destinati ad un ulteriore impiego o al consumo. In particolare, si definisce sottoprodotto, qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfi le seguenti condizioni:

- a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;
- b) è certo che l'oggetto o la sostanza sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;
- c) la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
- d) l'ulteriore utilizzo sia legale, ossia soddisfa tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute umana e dell'ambiente e non porterà impatti negativi sull'ambiente e sulla salute umana.

Nel rapporto rifiuti 2013 dell' ISPRA è riportata l'elaborazione dei dati 2011 di raccolta differenziata per frazione merceologica. Nel rapporto si è proceduto a ripartire i quantitativi dei rifiuti in carta, vetro, plastica, metallo e legno nelle voci imballaggi (capitolo 15 dell'Elenco europeo dei rifiuti) e altre tipologie di rifiuti, come si può vedere in Tabella 2.1.

L'esame dei dati della Tabella 2.3 evidenzia, tra il 2010 e il 2011, un incremento di 314 mila tonnellate (+7,5%) della raccolta differenziata della frazione organica (umido + verde), che fa seguito alla crescita di oltre 440 mila tonnellate (+11,8% circa) rilevata tra il 2009 e il 2010.

In Figura 2.7, invece, è possibile osservare l'andamento della raccolta differenziata per frazione merceologica nel periodo compreso tra gli anni 2010-2012.

**Tabella 2.3 Raccolta differenziata delle principali frazioni merceologiche su scala nazionale, anni 2007 – 2012 (ISPRA, 2013).**

Frazione merceologica		Quantitativo raccolto					
		2007	2008	2009	2010	2011	2012
		(1.000*t)					
Organico (umido + verde)		2.909,6	3.340,4	3.743,7	4.186,8	4.500,8	4.807,8
Carta e cartone	Imballaggi	2.698,1	1.103,3	1.263,2	1.271,9	1.203,2	3.038,8
	Altri rifiuti di carta		1.830,8	1.698,9	1.790,8	1.865,7	
Vetro	Imballaggi	1.205,7	1.314,9	1.173,6	1.480,9	1.426,5	1.638,3
	Altri rifiuti di vetro	91,5	181,3	529,0	297,6	273,5	
Plastica	Imballaggi	484,5	502,0	505,7	556,7	698,6	849,8
	Altri rifiuti di plastica	15,8	75,4	107,7	91,9	89,3	
Metallo	Imballaggi	198,3	116,8	166,6	159,4	158,7	245,0
	Altri rifiuti di metallo	163,5	236,9	173,6	158,4	144,3	
Legno	Imballaggi	642,6	201,1	201,8	201,1	203,2	607,6
	Altri rifiuti di legno		479,9	473,7	490,8	490,1	
RAEE		116,2	156,6	216,9	253,7	249,3	220,9
Ingombranti misti a recupero		201,3	221,2	328,7	315,6	304,3	365,5
Tessili		73,4	80,3	71,5	80,3	96,7	99,9
Selettiva		30,5	32,2	36,6	37,6	39,9	38,9
Altro		129,1	59,7	85,5	79,1	103,9	52,4
<b>Totale RD</b>		<b>8.960,1</b>	<b>9.932,8</b>	<b>10.776,7</b>	<b>11.452,6</b>	<b>11.848,0</b>	<b>11.964,8</b>

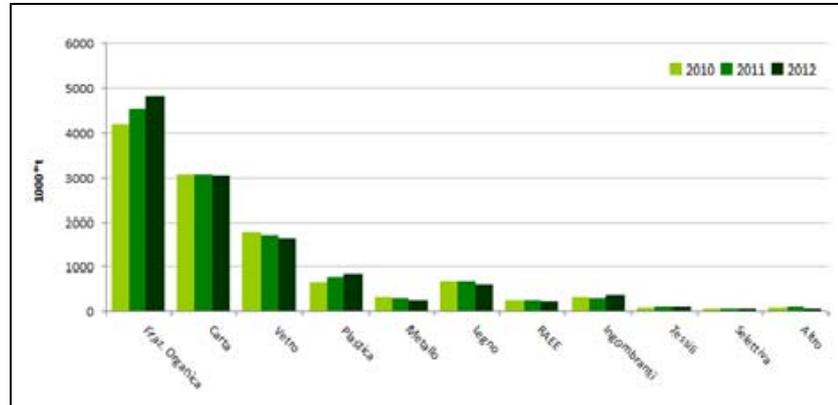


Figura 2.7 - Raccolta differenziata per frazione merceologica, anni 2010-2012 (ISPRA 2013).

Il raggiungimento di elevati livelli di intercettazione è il risultato dell'opportuna combinazione di diversi fattori. La promozione della raccolta differenziata può essere, infatti, perseguita attraverso differenti politiche (Mueller et al., 2013), la cui efficacia dipenderà soprattutto dal contesto in cui le stesse politiche sono calate, attesa la stretta correlazione tra i tassi di intercettazione e la partecipazione degli utenti ai programmi di raccolta differenziata (Sidique et al., 2010).

Appare evidente, tuttavia, che i dati quantitativi rappresentano solo uno degli aspetti da considerare ai fini del recupero di materia. In altre parole, affinché i sistemi di selezione alla fonte siano realmente efficaci ai fini del riciclaggio, è necessario che i materiali prodotti siano anche caratterizzati da un'elevata qualità, come evidenziato nel seguito.

### 2.3.1 Frazioni secche

I materiali recuperabili sono tutti i rifiuti che possono essere riutilizzati per produrre nuovi oggetti uguali allo scarto (vetro, carta) oppure utilizzati per produrre nuovi materiali (legno, tessuti). Le materie prime che possono essere riciclate sono:

- legno
- vetro
- carta e cartone
- tessuti
- alluminio

- acciaio
- alcune materie plastiche.

Solitamente, quando la separazione avviene all'origine, il grado di purezza, inteso come presenza di frazioni estranee, dei materiali recuperati risulta inferiore, anche se il costo del sistema di raccolta può risultare maggiore (Bohm et al. 2010).

In relazione ai maggiori quantitativi intercettati alla fonte c'è una maggiore attenzione per le frazioni costituite da materiale cellulosico, plastica, vetro e alluminio.

- **Carta e cartone**

Il recupero della carta è un settore specifico del riciclaggio dei rifiuti. Gli impieghi fondamentali della carta sono:

- supporto fisico per la scrittura e la stampa;
- materiale da imballaggio.

In Italia si consumano, all'anno, circa 117 chilogrammi di carta a persona. Fino a qualche anno fa, il 93% della carta proveniva dal taglio di alberi ed era responsabile di circa un quinto degli abbattimenti forestali del pianeta. Oggi, l'offerta complessiva di carta è sostenuta per il 55% dal taglio di nuovi alberi, per il 7% da altre materie prime e per il rimanente 38% da carta riciclata.

La raccolta differenziata della frazione cellulosica si attesta, nel 2011, a poco meno di 3,1 milioni di tonnellate, valore pressoché identico a quello del 2010 (rapporto ISPRA 2103).

La carta recuperata può essere trattata e riutilizzata come materia seconda per la produzione di nuova carta. La trasformazione del rifiuto cartaceo (che si definisce carta da macero) in materia prima necessita di varie fasi:

- raccolta e stoccaggio. In questa fase è particolarmente rilevante che le amministrazioni locali richiedano e organizzino la raccolta differenziata dei rifiuti;
- selezione, per separare la fibra utilizzabile dai materiali spuri - spaghi, plastica, metalli - che normalmente sono incorporati nelle balle di carta ad macero;
- sbiancamento, per eliminare gli inchiostri.

A questo punto del ciclo, la cellulosa contenuta nella carta-rifiuto è ritornata ad essere una materia prima, pronta a rientrare nel ciclo di produzione.

Le tipologie e le qualità di carta riciclabili come materiali da macero sono descritti e catalogati nella norma UNI 643:2002. Tale norma prevede la distinzione dei materiali in cinque gruppi:

- gruppo 1: qualità ordinaria;
- gruppo 2: qualità media;
- gruppo 3: qualità superiore;
- gruppo 4: qualità kraft;
- gruppo 5: qualità speciale.

Ciascun gruppo comprende una serie di materie prime seconde ottenute a valle della raccolta e della selezione; per ogni materiale viene data una breve descrizione delle caratteristiche che deve possedere.

In generale, tutte le materie prime seconde devono essere prive di componenti non cartacei pregiudizievoli per la produzione di carta e cartone (Sirini et al., 2010). In particolare, la normativa italiana di riferimento (D.M. 5/2/98) stabilisce che tali impurità, definite come materiali inutilizzabili, non devono superare l'1% in peso. Inoltre devono risultare assenti sostanze quali formaldeide e fenoli, mentre la somma di PCB e PCT deve essere inferiore a 25 ppm (Sirini et al. 2010).

È ovvio che la carta riciclata non produce un pari peso di carta “nuova”, sicché per fare una tonnellata di carta nuova ci vuole normalmente - e comunque in misura variabile a seconda degli impianti e del prodotto fabbricato - anche una certa percentuale di cellulosa fresca, e che il procedimento ha i propri costi economici, energetici e ambientali.

#### • **Plastica**

Essendo molto usata per gli imballaggi, la plastica è uno dei principali componenti dei rifiuti solidi; inoltre dato che non è biodegradabile e che produce diossine se bruciata, è fondamentale riciclarla quanto più possibile.

Molti tipi di plastica possono essere facilmente riciclati: si consideri, ad esempio, il caso del polietilentereftalato, PET, principalmente avviato alla produzione di un nuovo polimero e su cui è attiva l'organizzazione PetCore. Per i materiali plastici di bassa qualità e/o termoindurenti la procedura di recupero è più complessa, in quanto il costo di rilavorazione è generalmente superiore al costo di produzione di plastica nuova. Pertanto le numerosissime materie plastiche presenti sul mercato non possono essere mescolate fra di loro: un circolo vizioso da cui è difficile uscire, ma non impossibile.

La fase di selezione per i polimeri del materiale provenienti dalla raccolta differenziata riveste un'importanza cruciale per il buon esito dell'intero processo di riciclo dei rifiuti d'imballaggio in plastica, rappresentando la specificità del riciclaggio della plastica rispetto ad altri materiali (Furiano, 2008).

Attualmente, esistono impianti a tecnologia avanzata che permettono di separare automaticamente le varie tipologie di plastiche in tempi rapidi e quindi economicamente vantaggiosi, e sono già adottati in diversi paesi (Rapporto Federambiente, 2010; Furiano, 2008).

Il codice Unicode contempla l'identificazione numerica delle plastiche riciclabili, individuato dal numero all'interno del triangolo del simbolo del riciclo. In Tabella 2.4, si riporta la traduzione della tabella SPI-Society of the Plastics Industry.

**Tabella 2.4 Society of the Plastics Industry**

Codice riciclo	Abbreviazione	Nome del polimero e Possibili impieghi
1	PETE o PET	Polietilene tereftalato. Riciclato per la produzione di fibre poliestere, fogli termoformati, cinghi, bottiglie per bevande.
2	HDPE	Polietilene ad alta densità. Riciclato per la produzione di contenitori per liquidi, sacchetti, imballaggi, tubazioni agricole, basamenti a tazza, paracarri, elementi per campi sportivi e finto legno.
3	PVC o V	Cloruro di polivinile. Riciclato per tubazioni, recinzioni, e contenitori non alimentari.
4	LDPE	Polietilene a bassa densità. Riciclato per sacchetti, contenitori vari, dispensatori, bottiglie di lavaggio, tubi, e materiale plastico di laboratorio.
5	PP	Polipropilene o Moplen. Riciclato per parti nell'industria automobilistica e per la produzione di fibre.
6	PS	Polistirene o polistirolo. Riciclato per molti usi, accessori da ufficio, vassoi per cucina, giocattoli, videocassette e relativi contenitori, pannelli isolanti in polistirolo espanso.
7	ALTRI	Altre plastiche, tra le quali Polimetilmetacrilato, Policarbonato, acido polilattico, nylon e fibra di vetro.

Un settore in cui l'Italia è all'avanguardia è la cosiddetta bio-plastica, che risulta essere biodegradabile; è prodotta principalmente a partire da materie prime vegetali anziché petrolifere.

- **Vetro**

Il vetro costituisce circa l'11% in peso dei rifiuti solidi urbani (vedi tabella 2.1). Circa il 90% del vetro nei rifiuti è costituito da bottiglie e contenitori di colorati, verdi e marroni, o trasparenti; il restante 10% è costituito da lastre e cristalli. I vantaggi del riciclaggio del vetro possono essere riassunti in (Sirini, 2010):

- risparmio energetico per l'estrazione delle materie prime e per la fusione;
- riduzione delle emissioni in atmosfera connessa all'attività produttiva (minori temperature di fusione del rottame di vetro implicano una riduzione del volume dei fumi di combustione e delle emissioni);
- risparmio di materia prima;
- riduzione dei volumi avviati a discarica;
- miglioramento delle caratteristiche del compost o del CDR.

La quasi totalità del vetro riciclato viene utilizzato per produrre nuove bottiglie e contenitori in vetro. Una piccola parte del vetro recuperato viene utilizzato per la realizzazione della lana di vetro, usata per isolamento nelle costruzioni.

Nella lavorazione del vetro grezzo si producono scarti (frazioni estranee) la cui quantità è funzione della quantità del vetro grezzo in ingresso all'impianto di recupero/trattamento. È, inoltre, importante tener presente i seguenti obiettivi (Avella, 2008)

- utilizzare tecnologie in grado di assicurare l'eliminazione dei materiali metallici magnetici e amagnetici;
- separare la frazione fine (inferiore a 10mm) e provvedere alla successiva lavorazione della stessa;
- rimuovere la frazione indesiderata costituita da materiali ceramici e residui organici.

- **Materiali non ferrosi - Alluminio**

Questa tipologia di rifiuti comprende, oltre ai contenitori per bevande, alluminio sagomato o lavorato (tubi, telai di porte e finestre), pentolame, grondaie e pluviali (Sirini, 2010).

In Italia l'uso dell'alluminio riciclato rappresenta circa il 50% dell'uso totale dell'alluminio grezzo. Negli impianti la separazione può avvenire sia a mezzo di sistemi a correnti indotte che per cernita manuale; un'ulteriore frazione di alluminio viene recuperato dalle scorie residuali dei processi di termovalorizzazione.

L'alluminio riciclato ha le stesse proprietà e qualità dell'alluminio originario e viene impiegato nell'industria automobilistica, nell'edilizia, nei casalinghi e per nuovi imballaggi.

### **2.3.2 Frazioni umide**

Nella gestione integrata dei rifiuti urbani occorre dare priorità all'avvio e consolidamento alla raccolta differenziata, al fine di intercettare in purezza ed alla fonte la maggior quantità possibile di frazione umida presente. Occorre tener presente che una parte della frazione umida non viene intercettata e separata alla fonte, rimanendo quindi all'interno dei rifiuti indifferenziati da avviare a smaltimento. Risulta necessario, quindi, prevedere opportuni sistemi di separazione e trattamento di questa componente organica non differenziata al fine di ridurre gli impatti relativi allo smaltimento finale.

In genere, tale frazione umida include i rifiuti di provenienza alimentare e quelli provenienti da attività di manutenzione del verde pubblico e privato (Canadian Minister of the Environment, 2013). I rifiuti alimentari rappresentano una porzione significativa del materiale organico presente nei rifiuti urbani; si tratta di una frazione piuttosto omogenea costituita da scarti derivanti da attività domestiche ed eventuali scarti mercatali. A queste, si aggiunge il materiale cartaceo che non può essere recuperato come carta sporca e tovaglioli. I rifiuti derivanti da attività di manutenzione del verde pubblico e privato includono, invece, i materiali di risulta delle attività di cura del verde, ad esempio erbacce, raccolti in purezza e separati dagli altri flussi di rifiuti alla fonte. Generalmente tale materiale è abbastanza piccolo da non richiedere operazioni di macinazione o triturazione prima di essere avviato a trattamento. La composizione di questo materiale è molto variabile nei mesi, e anche le quantità possono variare di anno in anno, principalmente in relazione alle variazioni climatiche (Canadian Minister of the Environment, 2013).

Nel rapporto ISPRA 2013 si riporta che tra il 2011 e il 2012 è stato rilevato un incremento di 307 mila tonnellate (+6,8%), che porta il dato nazionale di raccolta dell'organico a un valore superiore a 4,8 milioni di tonnellate.

La componente organica dei rifiuti urbani rappresenta la frazione omogenea prevalente in peso, nonché la più problematica da gestire per gli impatti ambientali che è in grado di generare. Al fine di ridurre tali

impatti, sostanzialmente connessi alle sue caratteristiche di fermentescibilità, i metodi di trattamento più consoni prevedono l'utilizzo di processi biologici, mirati, in genere, al raggiungimento di idonei livelli di stabilità biologica (Belgiorno et al., 2011).

La frazione organica raccolta in maniera differenziata è, quindi, costituita, prevalentemente da:

- frazione organica da grandi utenze
- frazione organica di provenienza domestica.

La prima è generalmente caratterizzata da un grado di selezione piuttosto elevato. La Tabella 2.5 mostra i valori di alcuni parametri fisici e chimici reperiti in letteratura.

**Tabella 2.5 Caratteristiche della frazione organica da grandi utenze riportate in alcuni esempi di letteratura (Pavan et al., 2007)**

Riferimento bibliografico	TS (%)	TVS (%TS)	N (%TS)	P (%TS)
De Baere, 2000	31	70	-	-
Kubler et al., 1999	19	63	2,2-3,3	0,4-0,6
CITEC 2000 (*)	17-25	70-90	-	-
CITEC 2000 (**)	7-15	80-90	1,5-3	1-3

(\*)= provenienza domestica; (\*\*)= da grandi utenze

Si vuole sottolineare come il contenuto in secco dipenda dal peso dei residui di cui è composto: nel caso di mense, è particolarmente ricco di residui alimentari quali pane e pasta che tendono a farlo aumentare; nel caso di mercati ortofrutticoli, invece, il rifiuto organico presenta notevoli quantità di scarti vegetali ad alto contenuto d'acqua, motivo per il quale il tenore medio in secco di questa frazione spesso non raggiunge neppure il 10 %. Tali conclusioni possono essere tratte dalle tabelle che seguono.

**Tabella 2.6 Caratteristiche della frazione organica raccolta presso mense (Pavan et al., 2007)**

Parametro	Intervallo	Valore tipico
TS (%)	21,4-27,4	25,6
TVS (%TS)	91,3-99,7	96,5
TCOD (%TS)	1,2-1,3	1,2
TKN (%TS)	2,6-3,7	3,2
Fosforo totale (%TS)	0,13- 0,28	0,2

**Tabella 2.7** Caratteristiche medie della frazione organica da mercato ortofrutticolo (Pavan et al., 2007)

	Media	massimo	minimo	n. campioni	Dev. Standard
<b>TS, g/kg</b>	81,8	132,7	54,4	96,0	15,7
<b>TVS, %TS</b>	81,9	92,0	78,2	96,0	11,3
<b>TCOD,%TS</b>	1,0	1,5	0,7	32,0	18,1
<b>TKN, %TS</b>	2,1	3,3	1,4	23,0	0,5
<b>Fosforo totale, %TS</b>	2,8	3,3	1,3	23,0	0,5

Alla luce dei dati presentati nelle tabelle, si può complessivamente affermare che la frazione organica da raccolta differenziata è caratterizzata da un intervallo di tenore in secco che varia a seconda che prevalgano rifiuti mercatali (10÷25 %) o rifiuti e scarti di mense (20÷25%). Resta costante invece, la percentuale di volatili pari all'85-90 % dei totali, indipendentemente dalla composizione merceologica.

Analoga considerazione per i nutrienti che rappresentano entrambi il 2-3% dei solidi totali.

**Tabella 2.8** Caratteristiche della frazione organica da raccolta differenziata ottenute in diverse campagne di ricerca (Pavan et al., 2007)

Parametro	Cecchi et al.,1989	Sans et al.,1995
<b>TS, g/kg</b>	200	163,9
<b>TVS, %TS</b>	88	90
<b>TCOD, gO<sub>2</sub>/gTS</b>	1,1	1,1
<b>TKN, %TS</b>	3,2	2,1
<b>P tot, %TS</b>	0,4	2,6

Una nota a parte va fatta riguardo alle possibili influenze sul substrato, derivanti dalla stagionalità. A tale scopo, può essere utile considerare i dati riportati nella Tabella 2.9 in cui vengono sintetizzati i risultati ottenuti riguardo alla caratterizzazione chimico-fisica del rifiuto, ottenuta durante un anno di sperimentazione (Zorzi, 1997). Per questo substrato sono anche disponibili i contenuti in acidi grassi volatili, prodotti a seguito di fenomeni naturali di fermentazione che sono dell'ordine di

alcune migliaia di mg/l, a testimoniare il veloce instaurarsi di fenomeni di prefermentazione già nelle fasi di stoccaggio. Ciò che risulta evidente dall'analisi dei dati riportati, considerando in particolare quelli relativi alla fase solubile è che la stagionalità del substrato non sembra influire in modo determinante sulle caratteristiche, che rimangono su valori contenuti in intervalli relativamente ristretti.

**Tabella 2.9 Caratteristiche chimico-fisiche della frazione organica analizzate durante il periodo di un anno (APAT, 2005)**

	Ott	Feb	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Nov	Dic
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Gen	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Nov	Dic	Feb
<b>T (°C)</b>	12,6	7,5	21,4	22,2	24,5	23,1	15,1	8,8	7,1
<b>pH</b>	4,7	4,9	5,0	4,7	4,0	4,32	4,3	4,3	5,0
<b>TS (g/kg)</b>	95,4	93,6	96,3	94,7	88,6	105,8	103,4	102,6	97,3
<b>TVS (%TS)</b>	91,5	94,5	89,2	88,9	90,0	92,2	90,6	90,9	91,2
<b>TCOD (gO<sub>2</sub>/gTS)</b>	99,2	101,3	100,4	88,7	95,5	108,6	106,7	108,5	101,7
<b>SCOD (gO<sub>2</sub>/gTS)</b>	39,3	53,3	45,1	44,4	42,7	49,7	51,7	51,2	60,1
<b>TVFA (mgCOD/l)</b>	4092	4256	3948	3410	4062	7563	3023	3931	4563
<b>TKN(%TS)</b>	-	-	-	-	23,2	23,4	23,1	23,2	21,5
<b>Ptot (%TS)</b>	-	-	-	-	3,9	3,7	3,7	3,8	3,5

### 2.3.3 Le caratteristiche qualitative della frazione organica da selezione meccanica

Sebbene la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) sia tipicamente intercettata alla fonte, una considerevole porzione finisce nel rifiuto residuale da raccolta differenziata, da cui può essere opportunamente allontanata mediante selezione meccanica.

È ovvio che le opzioni di gestione variano in relazione alle modalità di selezione ed è per questo che si ritiene opportuno accennare, brevemente, alle caratteristiche della FORSU da selezione meccanica, evidenziandone le principali differenze rispetto a quella selezionata alla fonte.

Le caratteristiche della frazione organica da selezione meccanica sono influenzate dal tipo di impianto di produzione, oltre che, ovviamente, dalla qualità del materiale in ingresso.

Si riportano i dati di caratterizzazione di un rifiuto organico proveniente da una linea di selezione di tipo “complesso”, in cui la sequenza di operazioni prevede molti passaggi e la raffinazione ottenibile dei materiali è relativamente elevata nel contesto della selezione meccanica (Tabella 2.10).

**Tabella 2.10 Caratteristiche chimico- fisiche della frazione organica proveniente da un impianto di selezione di tipo “complesso” (Cecchi et al.,2003)**

	media	massimo	minimo	n. campioni	Dev. Standard
<b>TS, g/kg</b>	763,10	952,0	513,1	210	81,3
<b>TVS, %TS</b>	43,9	57,4	29,1	210	5,4
<b>TCOD,%TS</b>	59,6	90,4	23,3	41	17,4
<b>TOC, %TS</b>	19,3	34,4	7,5	187	5,3
<b>IC, %TS</b>	1,3	2,7	0,3	187	0,5
<b>TKN, %TS</b>	2,2	3,4	1,2	59	0,5
<b>P, %TS</b>	0,11	0,22	0,05	59	0,03

Dai dati presentati si evince l'elevato contenuto in solidi della frazione organica selezionata meccanicamente rispetto ai valori che normalmente caratterizzano le frazioni putrescibili del rifiuto urbano: ciò è imputabile all'importante presenza di inerti nel substrato indifferenziato, non completamente separabili attraverso questo approccio (Cecchi et al., 2003).

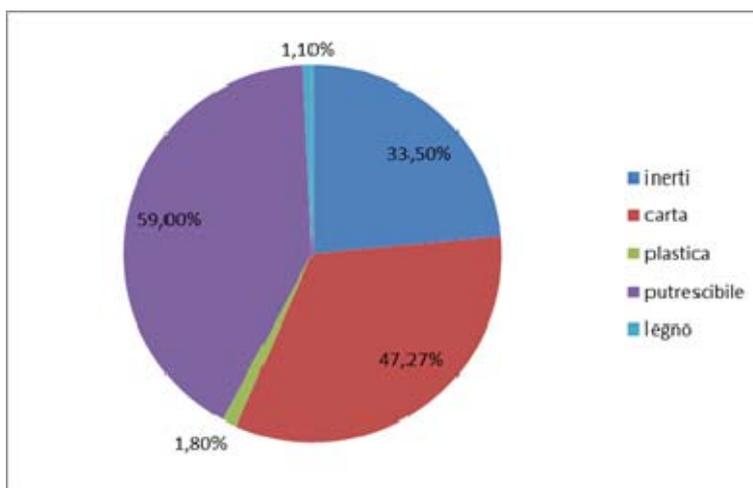
Tale aspetto risulta più evidente se si considera la percentuale di solidi volatili (TVS) che difficilmente raggiunge il 50 % dei solidi totali (TS).

La Tabella 2.11, la Figura 2.8 e la Figura 2.9 riportano la caratterizzazione merceologica come ripartizione percentuale di solidi totali e volatili.

Sono state considerate, a tal fine, cinque frazioni: materiale putrescibile, carta, legno, plastica ed inerti.

**Tabella 2.11** Caratteristiche merceologiche della frazione organica da selezione meccanica. I risultati sono espressi come percentuale di TS e TVS di ciascuna frazione al totale (Cecchi et al.,2003)

Frazioni	%TS	%TVS
Putrescibile	59	78
Carta	4,6	7,1
Legno	1,1	2,2
Plastica	1,8	3,4
Inerti	33,5	9,3
Totale	100	100



**Figura 2.8** Ripartizione percentuale dei TS nella frazione organica da impianto a tecnologia “complessa”. (Cecchi et al., 2003)

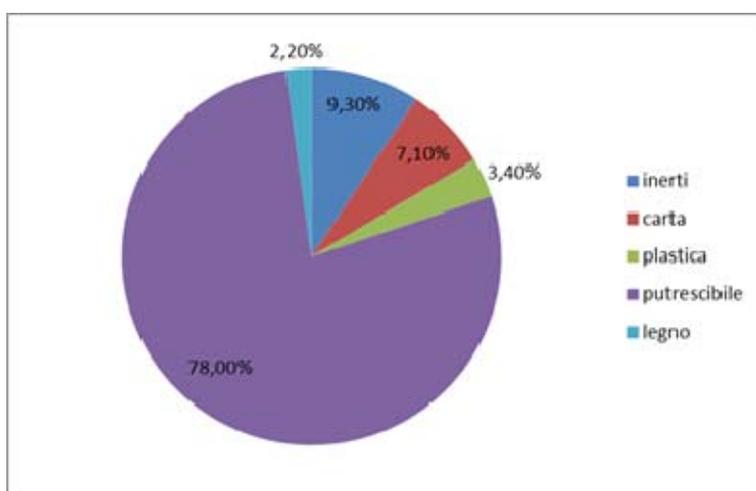


Figura 2.9 Ripartizione percentuale dei TVS nella frazione organica da impianto a tecnologia “complessa”. (Cecchi et al., 2003)

Se, invece, si fa riferimento ad un impianto di selezione con tecnologia “mediamente complessa”, operante in tempi diversi, con vagli a maglie più strette e più larghe, i risultati ottenuti sono quelli riportati in Tabella 2.12.

Tabella 2.12 Caratterizzazione chimico-fisica del rifiuto proveniente da impianto di tipo “mediamente complesso”(Cecchi et al.,2003)

	TS kg/kg	TVS kg/kg	TVS/TS %	TCOD kgO2/kg	TKN %TS	P %TS
Vaglio a maglie maggiori	0,54	0,27	47,0	0,6	1,1	0,1
Vaglio a maglie minori	0,50	0,33	68,0	1,0	0,7	0,4

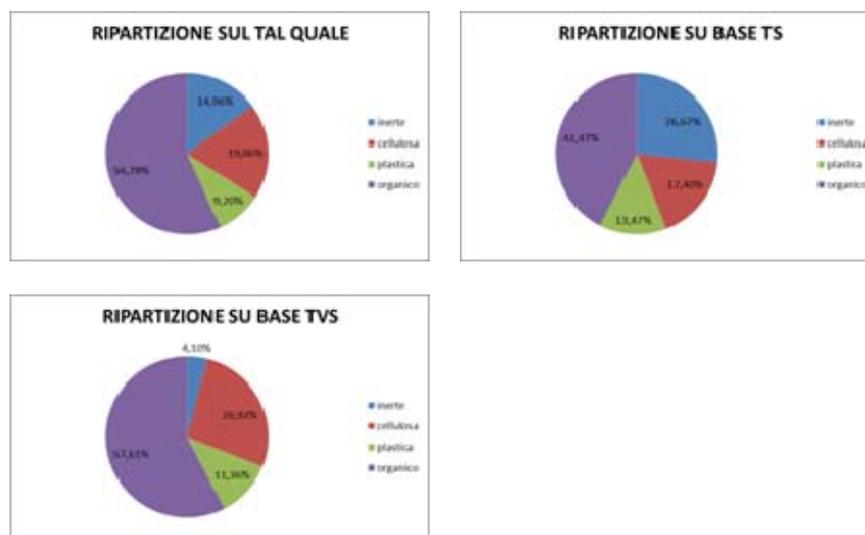
Riguardo al set di dati relativo al rifiuto ottenuto con maglie maggiori, si osserva che il contenuto di solidi volatili aumenta significativamente in termini percentuali rispetto ai campioni ottenuti con vaglio minore (da 47 a 68 %). La ragione di questo è da ricercare in un arricchimento della frazione organica, soprattutto a carico della frazione cellulosica, come

poi evidenziato dalle analisi merceologiche e anche suggerito dalla diminuzione del tenore di azoto.

La tabella seguente riporta i risultati ottenuti dalla caratterizzazione merceologica e la Figura 2.10 illustra graficamente le ripartizioni delle varie classi merceologiche del rifiuto relativamente ai campioni ottenuti con vaglio a maglie minori.

**Tabella 2.13 Caratterizzazione merceologica del rifiuto selezionato con vaglio a maglie di sezione ridotta in linea di selezione “semplice-mediamente complessa” (Cecchi et al.,2003)**

Frazioni	TS kg/kg	TVS kg/kg	TVS/TS %	Ripartiz. TQ %	Ripartiz. TS %	Ripartiz. TVS %
Cellulosica	0,5	0,3	67,0	19	17	27
Organica	0,4	0,3	62,0	57	43	58
Plastica	0,9	0,5	56,0	9	13	11
Inerte	0,9	0,7	7,0	15	26,6	4



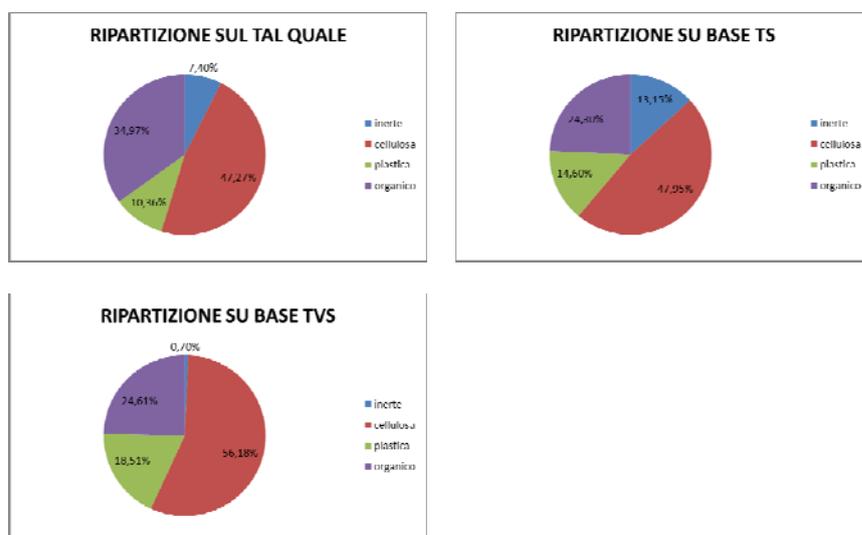
**Figura 2.10 Ripartizione percentuale delle classi merceologiche sui campioni ottenuti con vaglio minore con linea di selezione “mediamente complessa” (Cecchi et al., 2003).**

Le ripartizioni ricavate confermano le indicazioni date dalle analisi di caratterizzazione chimico-fisica; cioè la presenza di importanti frazioni di plastiche ed inerti (circa il 40 % del totale su base TS).

Si possono leggere in Tabella 2.14 i risultati delle prove merceologiche relativamente al campione ottenuto con vaglio a maglie maggiori, così come in Figura 2.11.

**Tabella 2.14** Analisi merceologica relative al campione ottenuto con vaglio a maglie maggiori (Cecchi et al., 2003)

Frazioni	TS kg/kg	TVS kg/kg	TVS/TS %	Ripartiz. TQ %	Ripartiz. TS %	Ripartiz. TVS %
Cellulosica	0,6	0,5	82,0	47	48	55
Organica	0,4	0,3	72,0	35	24	25
Plastica	0,8	0,7	88,0	10	15	19
Inerte	0,9	0,03	3,0	7,4	13	1



**Figura 2.11** Ripartizione percentuale delle classi merceologiche sui campioni ottenuti con vaglio a maglie maggiori con linea di selezione “mediamente complessa” (Cecchi et al., 2003) .

I risultati riportati mettono in luce, a prescindere dal tipo di vaglio utilizzato il rifiuto che residua alla vagliatura a partire dal rifiuto indifferenziato è ricco in frazioni inerti.

Anche Mata-Alvarez, in uno studio sull'applicazione della digestione anaerobica alla frazione organica da selezione meccanica proveniente dall'impianto di San Giorgio di Nogaro, riportano la seguente caratterizzazione (Tabella 2.15):

**Tabella 2.15 Caratteristiche chimico- fisiche della frazione organica proveniente dall'impianto di selezione meccanica di San Giorgio di Nogaro (Mata -Alvarez, 1995)**

	media	massimo	minimo	n. campioni	Dev. Standard
<b>TS, g/kg</b>	647,2	832,4	472,2	45	89,3
<b>TVS, %TS</b>	45,4	62,4	35,8	33	6,9
<b>TCOD,%TS</b>	51	76	23	22	15
<b>TC, %TS</b>	22,05	26,8	18,94	6	2,78
<b>TKN, %TS</b>	1,36	1,79	1,06	22	0,22
<b>P, %TS</b>	1,41	1,82	1,02	10	0,30

Altri dati di letteratura circa le caratteristiche chimiche e biologiche della frazione organica da selezione meccanica sono stati sintetizzati nelle due tabelle che seguono.

**Tabella 2.16 Caratteristiche della frazione organica da selezione meccanica e da raccolta differenziata(Bolzonella et al., 2006)**

Parametro	MS-OFMSW	SS-OFMSW
TS %	48-72 (60)	27-47 (33)
TVS %TS	35-91 (70)	55-90 (77)

MS-OFMSW=mechanically selected organic fraction of municipal solid waste; SS-OFMSW= source sorted organic fraction of municipal solid waste

**Tabella 2.17** composizione merceologica della frazione organica da selezione meccanica (Bolzonella et al., 2006)

Frazione (%)	MS-OFMSW	SS-OFMSW
Organico	10-16	70-83
Carta	34-50	7-12
Legno	2-4	1-6
Metalli	1-9	0-1
Vetro e inerti	2-14	1-4
Plastica	24-34	4-9
Tessili	3-8	1-3

Le tabelle evidenziano, in accordo con quanto già riscontrato da Cecchi et al. (2003), che il contenuto di solidi della frazione organica da selezione meccanica (60 %) è decisamente superiore a quello rinvenibile nella frazione organica da raccolta differenziata (33 %). Tale dato è ancora una volta, confermato dalla notevole presenza di plastica ed inerti (Tabella 2.15).

Un'ultima nota va rivolta alle caratteristiche biologiche di queste matrici. L'unico parametro che appare adatto a questa descrizione è la resa di conversione al tempo infinito,  $B_0$  : un esempio è riportato nella seguente tabella, che mette a confronto la biodegradabilità delle diverse matrici sino ad ora considerate (Mata- Alvarez et al., 1992):

**Tabella 2.18** Valori di  $B_0$  relativi alle diverse matrici considerate (Mata-Alvarez et al, 1992)

Provenienza	Fonte	$B_0$ ( $m^3_{CH_4}/kg_{TVS}$ )
Da selezione meccanica	Valorga, 1985	0,301
	De Vaere et al., 1984	0,321
	Pauss et al., 1984	0,397
	Roux et al., 1989	0,381
	Cecchi et al., 1989	0,158
Da grandi utenze	Mata- Alvarez et al., 1989	0,445
Domestica	Cecchi et al., 1986	0,401
	Mata-Alvarez et al., 1992	0,489

Dai dati di letteratura, si ricavano, quindi, i seguenti intervalli di produzione, espressi sia in termini di metano che di biogas prodotto. Considerando una percentuale del 55% di metano sul biogas prodotto, si possono ottenere i valori riportati in Tabella 2.19.

**Tabella 2.19 Rese di conversione a tempo infinito per i tre tipi di frazione organica (FO)**

Substrato	FO da selezione meccanica	FO da grandi utenze	FO da utenze domestica
$B_0$ ( $m^3_{CH_4}/kg_{TVS}$ )	0,16-0,37	0,45-0,49	0,37-0,40
$G_0^*$ ( $m^3_{CH_4}/kg_{TVS}$ )	0,29-0,66	0,81-0,89	0,67-0,72

\* $G_0$ = biogas prodotto a tempo infinito

Anche per tale parametro appare evidente la differenza che sussiste tra la frazione organica selezionata meccanicamente rispetto agli altri due substrati. La conseguenza immediata delle diverse caratteristiche di tali substrati è nella diversificazione dei processi di trattamento e ancor prima, nei pretrattamenti che si rendono necessari a monte di stabilizzazione di tipo biologico, sia essa di tipo aerobico o anaerobico.

I rifiuti residuali della raccolta differenziata ed i rifiuti “tal quali”, ovvero non raccolti in maniera differenziata, presentano maggiori difficoltà tecnico-operative di trattamento: si tratta, infatti, di un insieme di materiali eterogenei mescolati a causa della loro commistione in fase di raccolta e trasporto. In questo caso, il pretrattamento ha come obiettivi:

- la separazione ed il parziale recupero dei materiali (inerti, metalli, frazione organica di basso pregio);
- la riduzione della quantità di materiale da inviare in discarica;
- il miglioramento delle caratteristiche di combustibilità (riduzione dell'umidità e degli inerti, innalzamento del potere calorifico).

Nel caso, invece, del pretrattamento di matrici da raccolta separata, l'unico scopo è quello di rendere il flusso di organico da stabilizzare il più selezionato possibile in termini di frazioni indesiderate (plastiche, inerti e metalli).

## 2.4 LA TOSSICITÀ DEI RIFIUTI SOLIDI

La tossicità di una sostanza è una caratteristica sia qualitativa che quantitativa. Qualitativa in quanto dipende dalla interazione della struttura molecolare con le molecole biologiche a livello biochimico,

quantitativa in quanto l'azione tossica si manifesta solo quando si superano determinati livelli di concentrazione nell'ambiente o in alcuni organi dell'organismo (Tchobanoglous, 1997).

I materiali per cui è previsto il recupero di materia possono contenere un certo grado di tossicità proveniente dalle materie prime utilizzate durante il processo di riciclaggio. Si pensi, ad esempio, agli imballaggi per alimenti: questi potrebbero essere soggetti ad una contaminazione pregressa che si trasmetterebbe poi all'alimento per cui sono destinati. Tra le materie che vengono principalmente trattate e per le quali c'è una maggiore attenzione sono la carta e la plastica, ampiamente utilizzate per la produzione di imballaggi alimentari.

#### 2.4.1 La tossicità delle frazioni secche del rifiuto

Lo studio della tossicità di carta e cartone è stato ampiamente condotto in relazione agli imballaggi per gli alimenti realizzati con tali materiali (Ozaki et al., 2004). La carta e il cartone potrebbero, infatti, contenere inchiostri, adesivi e altre sostanze che non sono destinate ad entrare in contatto con alimentari.

A tal proposito uno studio condotto da Bononi et al. (2007) evidenzia il fatto che la legge italiana richiede l'utilizzo di cellulosa rigenerata anziché riciclata per la produzione di cartoni per l'imballaggio di alimenti quali, ad esempio, la pizza.

Alcune sostanze, ad esempio il disobutilftalato - DIBP (Figura 2.12), non sono presenti nella lista delle sostanze autorizzate per la fabbricazione di materiali ed oggetti di cellulosa rigenerati destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari. Il DIBP può essere utilizzato come plastificante negli adesivi e negli inchiostri da stampa a colori.

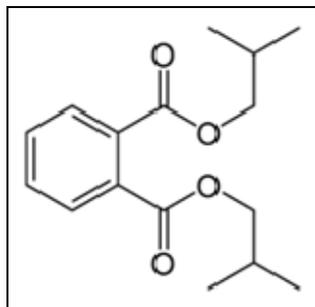


Figura 2.12 – Struttura chimica del diisobutylftalato (DIBP).

Alcuni ftalati, ad esempio il bisfenolo A (Figura 2.13), possono migrare nei prodotti alimentari contenuti nell'imballaggio in carta.

L'Agenzia nazionale francese per la sicurezza alimentare, sanitaria ambientale e del lavoro (Anses) ha pubblicato un rapporto in cui viene fatta una reale stima all'esposizione della popolazione al bisfenolo A attraverso l'ingestione di cibo, l'inalazione e l'assorbimento cutaneo (il contatto con alcuni prodotti di consumo). Secondo il rapporto, la maggiore fonte di esposizione al BPA è legata all'alimentazione (84% nel caso delle donne in gravidanza).

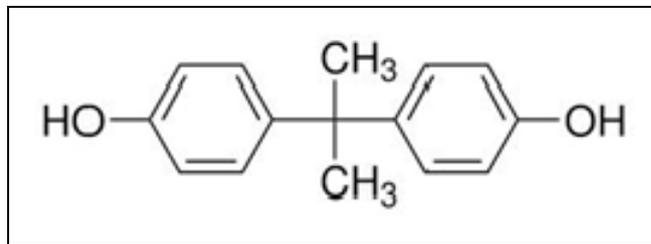


Figura 2.13 – Struttura chimica del Bisfenolo A

Nello studio condotto da Bononi et al. (2007) è stata descritta l'attività di questi due composti come *Endocrine disruptor* e sono stati esaminati i contenitori in carta e cartone utilizzati per le pizze d'asporto.

Il Regolamento 596/2009/CE presenta come principio base la considerazione che i materiali e gli oggetti destinati a venire a contatto, direttamente o indirettamente, con i prodotti alimentari devono essere sufficientemente inerti da escludere il trasferimento di sostanze ai prodotti alimentari in quantità tali da mettere in pericolo la salute umana o da comportare una modifica inaccettabile della composizione dei prodotti alimentari o un deterioramento delle loro caratteristiche organolettiche.

Sulla base di tali indirizzi, nello studio di Bononi et al. (2007) sono stati selezionati stralci di cartone della pizza d'asporto di diametro pari a 8cm. E' stata preparata una soluzione madre di DIBP ad una concentrazione di 1.033mg/l in etanolo. Altre soluzioni standard sono state preparate per successive diluizioni in modo da ottenere concentrazioni di DIBP pari a 0.41, 2.06, 20.66 e 41.32 mg/l; un'aliquota pari a 0.5 ml è stata prelevata da ciascun campione e trasferita in un beaker da 1l. I dischi di cartone selezionati sono stati inseriti in un contenitore in vetro da 1l

munito di cappuccio e dotato di un setto di Teflon. I campioni sono stati portati ad una temperatura prossima ai 60°C (dato che generalmente questa risulta essere la temperatura minima raggiunta in un cartone contenente della pizza appena cotta) e si è proceduto con delle analisi effettuate con gascromatografo, GC-MS. Dai risultati ottenuti risulta è evidente la possibilità di ritrovare tracce di questo contaminante all'interno dei contenitori per alimenti. Inoltre è possibile valutare l'indice di emissione (ER) e l'indice di esposizione (EI) che consentono di effettuare un confronto tra i diversi campioni, ed inoltre rende possibile la valutazione del rischio connesso. Si riportano i dati raggiunti da tal studio (Tabella 2.20).

**Tabella 2.20 – Valori dell'indice di emissione e dell'indice di esposizione relative ai diversi campioni di cartone di pizza d'asporto (Bononi et al. 2007)**

Code number	S*(dm <sup>2</sup> )	ER†(µg/ dm <sup>2</sup> )	EI ‡( µg)
H1	25,90	0,36	9,30
G2	25,90	0,71	18,40
A1	25,90	1,61	41,70
C3	25,90	0,76	19,70
B1	25,90	2,79	72,30
D1	25,90	1,90	49,20
D2	25,90	0,86	22,30
E1	25,90	0,46	11,90
E2	25,90	0,76	19,70
E4	25,90	0,78	20,20
C1	25,90	0,39	10,10
C2	25,90	0,33	8,50
F1	25,90	0,25	6,50
G1	25,90	0,29	7,50
I1	17,28	0,43	7,40
I2	17,28	0,43	7,70

\*S, internal area of take-away pizza box.

† ER, DIBP experimental release, representing the quantity of DIBP released from the unity area (1 dm<sup>2</sup>) of board under the adopted analytical standard conditions.

‡EI, DIBP exposure index, representing the calculation of DIBP quantity (µg) released in the real volume of the box in which the pizza is exposed.

Da studi condotti su carta copiativa chimica (CCC) nella carta riciclata, invece, si evidenzia la presenza di contaminanti con carattere apolare (Sturaro et al. 1994). La CCC è costituita da microcapsule polimeriche contenenti i formatori di colore disciolti in solventi. I solventi maggiormente utilizzati sono i diisopropilnaftaleni (DIPN), che in

assenza di un trattamento specifico nel processo industriale di riciclaggio, restano in parte inglobati tra le fibre di cellulosa, pronti a muovere non appena si presenti loro un ambiente più idoneo dal punto di vista chimico-fisico (Sturaro et al. 1994, Boccacci Mariani et al. 1999).

Le ricerche condotte da Sturaro et al. (1994) hanno dimostrato che questi solventi, a seconda del contenuto lipidico dell'alimento, possono trasferirsi con una discreta velocità nel prodotto stesso.

La situazione generale del cartoncino ottenuto da carta riciclata, per quanto riguarda la presenza di DIPN, si è dimostrata preoccupante in termini di diffusione.

Infatti, la raccolta della carta da macero non è ben differenziata in quanto sotto la stessa denominazione confluisce materiale celluloso di varia origine ed inoltre viene data scarsa rilevanza alla sua particolare composizione chimica legata alle precedenti applicazioni. Tenendo conto del notevole consumo di CCC e del grande utilizzo di cartone ottenuto da carta riciclata, il fenomeno non può essere sottovalutato per la persistenza e la stabilità chimica dei DIPN (Sturaro et al. 1994).

Anche la presenza di composti quali PCDD/PCDD e IPA (Figura 2.14), composti che derivano dalla combustione incompleta di combustibili fossili e sono sospetti di effetti mutageni e cancerogeni, all'interno del ciclo di lavorazione dei materiali cartacei è una problematica ben nota in letteratura scientifica, imputabile all'utilizzo congiunto di elevate temperature e di additivi chimici durante il processo industriale (Chalbot et al., 2006).

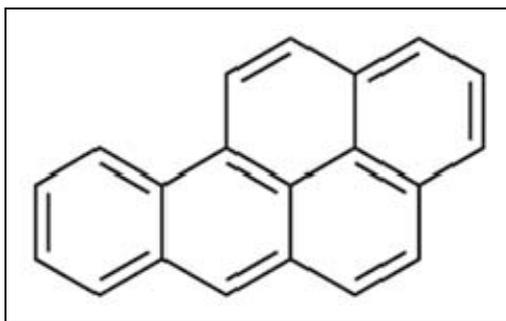


Figura 2.14 – Struttura chimica del benzo[a]pirene

Nella tabella seguente si riportano alcuni dati raggiunti nello studio di Chalbot (2006).

**Tabella 2.21- Concentrazione media di polvere, IPA e omologhi (Chalbot 2006).**

	Sbianca mento	Spraying/ Essic.to	Essicc.to/1 ucidatura	Taglio	Imball.gio	Imbal.gio	Stoccaggio
Dust (in µg/m <sup>3</sup> )	1793.5 ± 801.5	4243.6 ± 2529.5	508.6 ± 65.6	8731.0 ± 2026.0	568.6 ± 1	591.2 ± 41.5	645.8 ± 115.2
(i) PAH							
Abundan t PAH	Benzo[ b/k]- fluorant hene	Benzo[b/k ]- fluoranthe ne	Benzo[b/k ]- fluoranthe ne	Dimeth yl- phenan threnes	Benzo[b/k ]- fluoranthe ne	Benzo[b/k]- fluoranthene	Benzo[b/k ]- fluoranthe ne
Concentr ation (in ng/m <sup>3</sup> )	5.1 ± 1.1	6.4 ± 1.6	3.8 ± 0.5	41.4 ± 0.4	9.5 ± 1.6	10.8 ± 0.4	18.3 ± 0.9
CPAHs/ TPAHsa	0.64 ± 0.05	0.70 ± 0.07	0.79 ± 0.04	0.47 ± 0.02	0.81 ± 0.04	0.73 ± 0.02	0.78 ± 0.01
MP/Pa	1.56 ± 0.16	1.11 ± 0.12	0.98 ± 0.03	1.50 ± 0.08	0.89 ± 0.10	1.49 ± 0.19	0.88 ± 0.15
BaA/(Ba A + CT)a	0.21 ± 0.03	0.32 ± 0.08	0.27 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.33 ± 0.04	0.34 ± 0.03	0.25 ± 0.01
BeP/(Ba P + BeP)a	0.67 ± 0.06	0.65 ± 0.03	0.73 ± 0.08	0.75 ± 0.01	0.83 ± 0.04	0.79 ± 0.02	0.75 ± 0.01
Fl/(Fl + Py)a	0.48 ± 0.01	0.51 ± 0.01	0.53 ± 0.05	0.42 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.37 ± 0.01	0.50 ± 0.01
IP/(IP + BgP)a	0.28 ± 0.05	0.30 ± 0.05	0.36 ± 0.10	0.42 ± 0.01	0.52 ± 0.01	0.51 ± 0.03	0.48 ± 0.06
(ii) Aliphatic hydrocar bons							
Cm–Cn	–	–	–	C20– C27	C20–C27	C20–C27	C20–C27
Cn, max	–	–	–	C22	C23	C24	C22
Concentr ation (in ng/m <sup>3</sup> )	–	–	–	4297.9 ± 794.9	286.8 ± 65.3	180.6 ± 18.9	688.6 ± 141.4
UCM (in _g/m <sup>3</sup> )	5.2 ± 0.9	5.7 ± 1.8	2.8 ± 1.2	229.7 ± 38.3	14.2 ± 3.7	7.1 ± 0.3	36.6 ± 9.0
CPIb	–	–	–	1.05 ± 0.01	0.96 ± 0.06	1.51 ± 0.64	1.13 ± 0.08
UCM/N Ab	–	–	–	57.1 ± 19.5	49.6 ± 4.9	40.9 ± 4.6	55.2 ± 9.9
%WNA <sup>b</sup>	–	–	–	14.48	12.52	19.12	9.84

a MP/P, methyl-phenanthrenes to phenanthrene; BaA/(BaA + CT), benzo[a]anthracene to (benzo[a]anthracene and chrysene/triphenylene); BeP/(BaP + BeP), benzo[e]pyrene to (benzo[e]pyrene and benzo[a]pyrene); Fl/(Fl + Py), fluoranthene to (fluoranthene and pyrene); IP/(IP + BgP), indeno[123-cd]pyrene to (indeno[123-cd]pyrene and benzo[ghi]perylene).

b CPI, carbon preference index; %WNA content, leaf wax n-alkanes; UCM, unresolved complex mixture; NA, total n-alkanes concentration.

Sebbene la loro presenza nei prodotti cartacei sia stata scientificamente accertata, va precisato che, attualmente, tali composti non sono considerati nemmeno tra le classi di sostanze assunte a riferimento dal DM 21.03.73 e ss.mm.ii. per la verifica delle caratteristiche di qualità degli imballaggi in carta e cartone destinati al contatto con gli alimenti.

In riferimento ai materiali e agli oggetti in plastica destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari si fa riferimento alla Direttiva 2008/39/CE la quale nell'Allegato III contiene un elenco comunitario di additivi che possono essere utilizzati per la fabbricazione di materiali ed oggetti in plastica. L'elenco contiene le seguenti informazioni:

- colonna 1 (n. Rif.): il numero di riferimento CEE per i materiali da imballaggio riguardante la sostanza riportata nell'elenco;
- colonna 2 (n. CAS): il numero CAS (Chemical Abstracts Service);
- colonna 3 (Denominazione): la denominazione chimica;
- colonna 4 (restrizioni e/o specifiche): può comprendere il limite di migrazione specifica (LMS), la quantità massima di sostanza ammessa nel materiale od oggetto finito (QM), la quantità massima di sostanza ammessa nel materiale ed oggetto finito espressa in  $\text{mg}/\text{dm}^2$  di superficie indicata, ogni altro tipo di specifiche relative alla sostanza o al polimero.

Per quanto concerne, invece i materiali e gli oggetti di plastica riciclata destinati a venire a contatto con gli alimenti si fa riferimento al Regolamento (CE) n. 282/2008 il quale evidenzia il fatto che i rifiuti di imballaggi in plastica possono contenere residui degli impieghi precedenti e contaminanti provenienti da usi impropri ed a sostanze non autorizzate. E' pertanto necessario stabilire disposizioni speciali per garantire che i materiali e gli oggetti di plastica riciclata destinati al contatto con gli alimenti siano conformi alle prescrizioni del Regolamento CE n. 1935/2004, il quale fornisce delle indicazioni circa la tutela del consumatore.

Le principali famiglie di sostanze potenzialmente tossiche che si possono ritrovare all'interno di tali materiali sono le seguenti:

- Nonilfenoli (NPE);
- Idrocarburi Policiclici aromatici (IPA);
- Ftalati (DEHP).

Il Nonilfenolo è uno dei principali componenti della degradazione dell'alchilfenolo, un particolare tipo di surfactante polmonare (Bokern, M. e Harms, H. 1997). Il NPE è un composto molto utilizzato nella produzione di cosmetici, prodotti per la pulizia, vernici e pesticidi. A

causa delle notevoli problematiche legate alla formazione di schiume sulla superficie delle acque si è andato sviluppando sempre più l'utilizzo di detergenti molto più degradabili dal punto di vista biologico (Jones et al. 2003).

Il NP, precursore di NPE, può entrare nell'ambiente durante la produzione, l'utilizzo, il trasporto o tramite fuoriuscite accidentali dai contenitori. La contaminazione dell'ambiente può avvenire tramite il trattamento di colture per mezzo di alcuni pesticidi, tramite l'abbancamento non corretto di fanghi o tramite l'applicazione di fanghi di depurazione, legno o carta ai suoli agricoli. La biodegradazione è uno dei principali processi che ne consente una parziale degradazione. Tale processo si sviluppa in tre fasi principali: una prima fase che vede la rimozione del gruppo etossilico con la formazione di prodotti intermedi di degradazione, la seconda fase, invece, consiste nella trasformazione di tali composti in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e composti inorganici.

I prodotti intermedi della degradazione risultano essere difficilmente degradabili, per tale motivi l'ultima fase del processo risulta molto più lenta delle precedenti. La velocità di degradazione dei composti aumenta all'aumentare della temperatura.

La tossicità equivalente (TEQ) viene valutata calcolando la tossicità relativa ai singoli composti e sommandole:

$$TEQ = \sum_{i=1}^n (C_i \times TEF_i)$$

Dove:

*TEQ* è la concentrazione della miscela di nonifenoli espressa come tossicità equivalente di NP;

*n* è il numero di composti del nonilfenolo;

*i*=1, 2, ..., *n*;

*C<sub>i</sub>* è la concentrazione dell'*i*-esimo composto;

*TEF* è il fattore di tossicità dell'*i*-esimo composto.

In

Tabella 2.22 si riportano i fattori di tossicità equivalente proposti nel lavoro di Servos et al. (2000).

**Tabella 2.22 – Fattori di tossicità  $TEF_i$  (Servos et al. 2000)**

Composto	TEF
NP	1
NP <sub>n</sub> EO (1=n=8)	0.5
NP <sub>n</sub> EO (n=9)	0.005
NP <sub>1</sub> EC	0.005
NP <sub>2</sub> EC	0.005
OP	1
OP <sub>n</sub> EO (1=n=8)	0.5
OP <sub>n</sub> EO (n=9)	0.005
OP <sub>1</sub> EC	0.005
OP <sub>2</sub> EC	0.005

L'applicazione di tale approccio è valida fin quando tutti i composti della miscela presentano una modalità comune di manifestare i rispettivi effetti tossici in modo tale da renderli confrontabili e addizionabili.

Un'altra categoria di composti che possono essere presenti all'interno dei materiali plastici sono gli ftalati (DEHP). Molti di questi sono degradabili sia aerobicamente che anaerobicamente. Tali sostanze sono facilmente assorbibili dalle piante e presentano effetti tossici nei confronti dei microorganismi presenti nei terreni.

Gli ftalati sono comunemente utilizzati come plastificanti per i materiali in PVC, per tale motivo molti prodotti comunemente utilizzati, come ad esempio: abiti, prodotti cosmetici, giocattoli per bambini, imballaggi per alimenti, etc., contengono al proprio interno vari composti appartenenti a tale famiglia. Siccome tali composti non sono legati chimicamente al PVC, questi possono percolare, migrare oppure evaporare nell'ambiente, nell'atmosfera, negli alimenti, etc. i consumatori di tali prodotti possono essere esposti a tale rischio tramite contatto, lisciviazione in altri prodotti, etc.

La valutazione del rischio dovuto agli ftalati è stata studiata da diversi esperti sia in Europa che in America (ad esempio l'European Food Safety Authority – EFSA, 2004).

Questi composti presentano una bassa tossicità acuta con un valore dell' $LD_{50}$  compreso tra 1-30 g/Kg<sub>bw</sub>; studi eseguiti sui roditori hanno

mostrato effetti negativi sull'apparato endocrino. Tutti gli ftalati sono risultati negativi in riferimento alla mutagenicità e alla genotossicità, invece per quanto concerne la cancerogenicità i risultati ottenuti risultavano essere piuttosto contraddittori. L'IARC ha definito tale categoria di sostanze come "non classificabile" dal punto di vista della cancerogenicità.

Negli ultimi anni il "National Toxicology Program Centre for the Evaluation of Risks to Human Reproduction" (NTP-CERHR, 2005) ha eseguito ulteriori analisi per capire gli effetti di tali sostanze sul sistema endocrino. Sette tipi di ftalati sono stati selezionati per valutarne la tossicità vista l'elevato livello di esposizione soprattutto nell'uomo e nei bambini. A causa della mancanza di dati riferiti all'uomo, sono stati condotti degli studi sugli animali misurando il NOAEL e il LOAEL, i dati sono stati confrontati con i pochi studi condotti sull'uomo. Da tale studio si è evinto che esposizione pari a 100mg/Kg al giorno determinano già un incremento della tossicità (Heudorf et al. 2007). In riferimento al rischio minimo (MRL) relativo all'esposizione a tali sostanze l' " Agency for Toxic Substance and Disease Registry" ha calcolato un livello minimo pari a 0.06mg/Kg/d basato su un NOAEL pari a 5.8 mg/Kg e su un LOAEL pari a 140mg/Kg.

Gli ftalati sono presenti non solo all'interno di prodotti di consumo, ma anche negli alimenti, nell'aria e nella polvere presente all'interno degli ambienti. Molti ftalati sono stati approvati come additivi indiretti all'interno di alcuni alimenti, in quanto sono presenti all'interno degli imballaggi. Il livello di tali composti è notevolmente variabile e tali imballaggi costituiscono la principale sorgente di contaminazione.

Particolare attenzione viene rivolta ai prodotti destinati a venire a contatto con i bambini, si pensi, ad esempio ai giocattoli in plastica. Vari studi hanno dimostrato che tali prodotti presentano un certo contenuto di ftalati che potrebbero determinare effetti tossici sui bambini, i quali, particolarmente in tenera età, tendono a portare alla bocca gli oggetti con cui giocano con una possibile ingestione di piccole quantità di tali sostanze. Per tale motivo la Comunità Europea ha vietato l'uso di tali sostanze per la produzione di giocattoli in plastica destinato ai bambini di età inferiore ai tre anni.

È ormai provato, inoltre, che l'esposizione a ftalati nei neonati è maggiore che negli adulti. Infatti una stima delle dosi giornaliere di ftalati ha fornito i seguenti risultati: 9µg/Kg/d nei neonati, 19 µg/Kg/d negli adolescenti, 14 µg/Kg/d nei bambini e 6 µg/Kg/d negli adulti.

Per quanto concerne la famiglia degli idrocarburi policiclici aromatici, IPA, uno dei composti, la cui tossicità è stata più volte evidenziata, è il benzo[a]pirene (Figura 2.14).

#### **2.4.2 La tossicità della Frazione umida**

Il recupero della frazione umida del rifiuto può essere realizzato con differenti tecnologia e processi, per le diverse tipologie di trattamento è importante non sottovalutare gli effetti negativi legati ai rischi ambientali e sanitari connessi al possibile contenuto di sostanze pericolose, quali agenti patogeni, microinquinanti organici, ed in particolare metalli pesanti ed altri elementi tossici che, per la loro tendenza a persistere e a bioaccumularsi, devono essere particolarmente tenuti sotto controllo (Jones e Huang, 2003).

Ad esempio, nel caso dell'utilizzo del compost in agricoltura si devono valutare gli effetti legati all'incremento del contenuto totale di elementi tossici per effetto del bioaccumulo, ma contemporaneamente, la riduzione della biodisponibilità degli elementi tossici già presenti nel suolo, in quanto può modificare direttamente o indirettamente le caratteristiche chimico-fisiche del suolo stesso da cui dipendono la solubilità e le cinetiche di dissociazione (Parè et al. 1999).

La comune tendenza è quella di produrre dai rifiuti un "compost pulito" dal punto di vista ambientale. Attualmente solo alcuni paesi hanno specificato, nel campo di applicazione delle proprie norme, che alcuni materiali dovrebbero essere esclusi dal processo di compostaggio.

L'EPA (United States Environmental Protection Agency) sta provvedendo alla redazione di norme comuni per stabilire dei valori limite ben precisi. Alcuni paesi redigono linee guida in cui vengono fissati dei valori limite per i PCB e per alcuni pesticidi potenzialmente presenti nella matrice organica. Altri paesi, invece, come l'Italia, presentano regolamenti locali circa l'impiego di determinati pesticidi in agricoltura considerando anche il fatto che tali materiali potrebbero essere presenti nei materiali in ingresso agli impianti di trattamento.

In uno studio condotto da Brinton (2000) sono elencati i pesticidi che più frequentemente vengono ritrovati all'interno della matrice compost, ovvero Carbaril, Atrazina, Clordano e Chlorpyrifos. La difficoltà nel degradare tali composti è stata identificata come una fonte di fitotossicità, per tale motivo si pensa che sia opportuno, in futuro,

sottoporre il compost ad analisi specifiche per garantire l'assenza di danno potenziale per le piante.

Negli ultimi anni si è destato notevole interesse nei riguardi di contaminanti cancerogeni e mutageni presenti nei residui organici, quali ad esempio gli IPA, famiglia di composti organici con più anelli condensati, classificati dallo IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) come probabili e possibili cancerogeni per l'uomo (rispettivamente classe 2A e 2B).

Nella Tabella 2.23 sono elencati i principali IPA e le loro caratteristiche.

**Tabella 2.23 – Principali IPA e loro caratteristiche**

Nome	EPA Priority Pollutants	Cancerogeno per l'uomo (IARC, 2010)	Cancerogeno negli alimenti (EFSA, 2008)	Cancerogeno secondo l'allegato VI dell'ordinanza nr. 1272/2008
Benzo(a)pirene	X	2A	X	X
Ciclopenta(c,d)pirene		3		
Dibenzo(a,h)antracene	X	2A	X	X
Dibenzo(a,l)pirene		2B		
Benzo(j)aceantrilene		-		
Benzo(a)antracene	X	2A	X	X
Benzo(b)fluorantene	X	2B	X	X
Benzo(j)fluorantene		2B		X
Benzo(k)fluorantene	X	2B	X	X
Benzo(c)fenantrene		3		
Benzo(e)pirene				X
Crisene	X	2B	X	X
Dibenzo(a,h)pirene		2B		
Dibenzo(a,i)pirene		2B		
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	X	2B	X	
5-metilcrisene		2B		
Benzo(g,h,i)perilene	X	3	X	
Antracene	X	3		
Acenaftene	X	-		
Acenaftilene	X	-		
Fluorantene	X	3		
Fluorene	X	3		

Naftalina	X	-		
Fenantrene	X	3		
Pirene	X	3		
1 Cancerogeno dimostrato per l'uomo 2A Cancerogeno probabile per l'uomo 2B Cancerogeno possibile per l'uomo 3 Non cancerogeno per l'uomo				

Un'altra categoria di contaminanti che possono essere ritrovati nei residui organici sono i composti organici volatili (VOC), la fonte di tali composti è stata attribuita alla presenza di rifiuti pericolosi negli RSU. Komilis, nel 2004, ha proposto uno studio relativo all'identificazione e alla quantificazione di particolari VOC emessi durante il compostaggio di tre tipologie di rifiuto (scarti di mensa, verde e ramaglie e carta) e di una miscela delle tre. Nella seguente tabella vengono riportati i risultati di tale studio.

**Tabella 2.24 – Percentuali di VOC emessi da particolari tipologie di rifiuti organici e dalla loro miscela**

	Unseeded carta mista (MXP <sub>ns</sub> ) (%)	Carta mista (MXP) (%)	Unseeded Rifiuti da giardino (YW <sub>ns</sub> ) (%)	Unseeded scarti di mensa (FW <sub>ns</sub> ) (%)	Seeded scarti di mensa (FW) (%)	Mix di rifiuti da giardino (MXP/YW) (%)	Mix di carta and scarti di mensa (MXP/FW) (%)	Seed (%)
Alcani	29	2.3	13	0.2	0.6	0	15	8
Alcheni	3.0	0	5.8	2.2	0.4	0		0
Acidi/Esteri	3.6	4.5	0	15	0.1	33		5.3
Alcoli	11	75	0.5	11	1.2	2.4	5.8	4.9
Chetoni	1.3	5.2	17	5.1	0.2	25	9.7	19
Terpeni	5.7	2.2	37	9.2	3.4	16	9.3	20
Idrocarburi aromatici	30.1	4.1	18	4.7	50	13	52	23
Metossibenzeni/fenoli	1.9	3.0	0	2.2	0.2	0		0
Aromatici clorurati	1.6	0.8	0.7	0	0.2	2	2.5	2.5
Solfuri	0	0	3.1	35	38	0	0.15	2.5
Silossani	13	3.4	0.6	8.7	5.4	6.2	5.7	15
Piridinie,pirazine, 2-pentilfurano	0	0.04	4.3	6.5	0.5	3	0.15	0

Il risultato di questo lavoro mostra che il compostaggio degli RSU può essere una fonte di VOC pericolosi.

Per quanto concerne i composti quali pesticidi e metalli pesanti presenti nelle materie prime questi possono essere pericolosi per le persone che

gestiscono tali materiali, possono entrare nell'ambiente e possono essere nocivi per i vegetali che crescono nei suoli trattati con compost e per gli animali che si nutrono di piante coltivate su terreni trattati con compost. Analogamente per l'uomo che si nutre di verdure prodotte con tale compost. La persistenza nell'ambiente di un pesticida dipende in larga parte dalla sua struttura chimica e dalla presenza di particolari gruppi funzionali. La struttura chimica è fondamentale per la determinazione della solubilità del composto e di conseguenza della sua biodisponibilità, dato che i microrganismi assimilano più rapidamente i composti solubili in acqua. Quando un determinato gruppo funzionale è legato alla struttura della molecola con un legame debole è più rapidamente degradabile; aggiungendo acqua alla soluzione è possibile rompere i legami deboli attraverso un processo di idrolisi. Alcuni tipi di pesticidi, però, risultano insolubili in acqua, di conseguenza tendono ad essere assorbiti dalla sostanza organica riducendo la loro biodisponibilità. I pesticidi adsorbiti sono, in genere, molto più resistenti di quelli solubili.

I metalli pesanti che destano maggiori preoccupazioni sono: arsenico, As, cromo, Cr, ferro, Fe, cobalto, Co, rame, Cu, zinco, Zn, cadmio, Cd, nichel, Ni, e mercurio, Hg (Khan S. J. et al. 2007).

Una caratteristica dei metalli pesanti è che, a differenza di molte altre sostanze tossiche, non sono biodegradabili e possono accumularsi a concentrazioni potenzialmente tossiche (Bolan et al. 2004). Nel processo di compostaggio, i contaminanti metallici non vengono degradati ma possono essere convertiti in sostanze organiche che hanno una minore biodisponibilità. Parè et al. (1999) registrarono un aumento della concentrazione totale di contaminanti metallici che andava dal 26% al 145% dopo 41 giorni di compostaggio.

I metalli pesanti rappresentano un rischio potenziale non trascurabile, per tale motivo sono stati condotti numerosi studi che hanno mostrato significative differenze nei contenuti di metalli pesanti presenti negli output delle unità di trattamento meccanico-biologico (MBT) e nel compost, come è possibile vedere nella tabella seguente (Krauss e Grammel, 1992).

**Tabella 2.25. – Metalli pesanti presenti negli output degli MBT e nel compost (Krauss e Grammel, 1992)**

<b>Metalli pesanti</b>	<b>MBT OUTPUT</b>	<b>COMPOST</b>
Pb	420	83
Cu	222	41
Zn	919	224
Cr	107	61
Ni	84	26
Cd	2,8	0,4
Hg	1,9	<0,2

Come è possibile osservare dai dati riportati in tabella, i valori per i metalli pesanti presenti negli output delle unità di trattamento meccanico-biologico (MBT) risultano di gran lunga maggiori rispetto a quelli del compost, derivante da rifiuto organico selezionato alla fonte. Diversi studi hanno confermato che la tossicità dei metalli pesanti è legata principalmente alla concentrazione dei metalli presenti in forma ionica rispetto a quella totale (Nolan et al. 2003).



### 3 FORME DI RECUPERO DEL MATERIALE CELLULOSICO

I processi di trattamento e recupero dei rifiuti consistono nella trasformazione e/o riduzione dei quantitativi raccolti attraverso il ricorso ad una rete di infrastrutture impiantistiche di diversa tipologia.

Le attività di raccolta, trattamento e smaltimento dei rifiuti cellulose sono disciplinate dalla normativa vigente in materia di rifiuti, la quale definisce la gerarchia delle diverse opzioni di gestione perseguibili, stabilisce le caratteristiche qualitative dei materiali da avviare a trattamento e/o smaltimento nonché le possibilità di impiego dei materiali recuperati.

Nel capitolo precedente, si è specificato che cosa sono “i non-rifiuti”, ponendo l'attenzione sui sottoprodotti e sulle ex materie prime secondarie, in riferimento al Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1988, che, in Italia, disciplina il recupero dei rifiuti non pericolosi in procedura semplificata.

In particolare, l'articolo 33 stabilisce le condizioni per l'accesso alle suddette procedure:

- le quantità massime impiegabili;
- la provenienze, i tipi e le caratteristiche dei rifiuti, le condizioni specifiche di utilizzo degli stessi;
- le prescrizioni necessarie per assicurare che i rifiuti siano recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti e metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente.

I dettagli sono, poi, riportati nell'Allegato 1 - suballegato 1 per ciascuna tipologia di rifiuto, ove vengono, individuate anche le attività, i procedimenti e i metodi di riciclaggio o di recupero di volta a garantire l'ottenimento di sottoprodotti o di materie prime o di ex-materie prime secondarie (*ex-mps*), aventi caratteristiche merceologiche conformi alla normativa tecnica di settore o, comunque, nelle forme usualmente commercializzate.

In particolare, le condizioni relative ai rifiuti cellulose sono riportate al Punto 1 del Sub. Allegato 1 "*Rifiuti di carta, cartone e prodotti di carta*":

**Tabella 3.1 Caratteristiche qualitative dei rifiuti cellulosici avviabili alle procedure semplificate**

<b>Tipologia di rifiuti</b>	rifiuti di carta, cartone e cartoncino, inclusi poliaccoppiati, anche di imballaggi: CER 150101 150105 150106 200101
<b>Provenienza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- attività produttive,</li> <li>- raccolta differenziata di RU, altre forme di raccolta in appositi contenitori su superfici private;</li> <li>- attività di servizio.</li> </ul>
<b>Caratteristiche del rifiuto</b>	rifiuti, costituiti da cartaccia derivante da raccolta differenziata, rifiuti di carte e cartoni non rispondenti alle specifiche delle norme Uni-En 643.
<b>Attività di recupero</b>	<p>a) riutilizzo diretto nell'industria cartaria [R3]  b) messa in riserva [R13] per la produzione di materia prima secondaria per l'industria cartaria mediante selezione, eliminazione di impurezze e di materiali contaminati, compattamento in conformità alle seguenti specifiche [R3]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- impurezze quali metalli, sabbie e materiali da costruzione, materiali sintetici, vetro, carte prodotte con fibre sintetiche, tessili, legno nonché altri materiali estranei, max 1% come somma totale;</li> <li>- carta carbone, carte bituminate assenti;</li> <li>- formaldeide non superiore allo 0,1% in peso;</li> <li>- fenolo non superiore allo 0,1% in peso;</li> <li>- PCB + PCT &lt;25 ppm.</li> </ul>
<b>Caratteristiche delle materie prime e/o prodotti ottenuti</b>	<p>a) carta, cartone e cartoncino nelle forme usualmente commercializzate;</p> <p>b) materie prime secondarie per l'industria cartaria rispondenti alle specifiche delle norme UNI-EN 643.</p>

Per i materiali recuperati e destinati al recupero ambientale, si prevede l'esecuzione di un test di cessione, realizzato ai sensi di dell'Allegato 3. L'impiego di tali prodotti risulta possibile solo nel caso in cui i valore di concentrazione esibiti dall'eluato risultano conformi ai limiti stabiliti dallo stesso allegato.

La frazione merceologica costituita dagli imballaggi cellulosici (carta e cartone) risulta essere la più cospicua nei 27 Stati membri dell'Unione Europea, per la quale si registra una produzione, per l'anno 2010, pari a circa 31,1 milioni di tonnellate, corrispondenti al 39,5% del totale dei rifiuti generati, come è possibile osservare in Figura 3.1 (Rapporto ISPRA 2013).

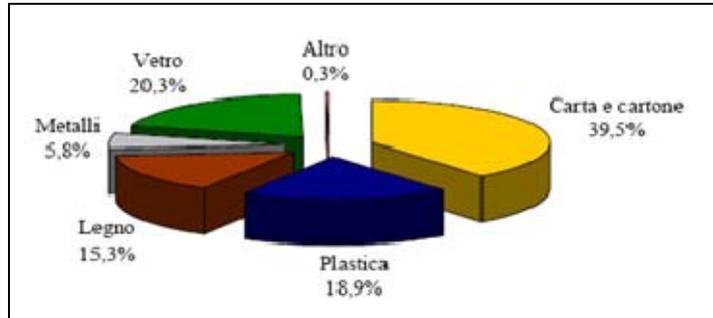


Figura 3.1 - Produzione dei rifiuti di imballaggio nell'UE per frazione merceologica (ripartizione percentuale), anno 2010 (Rapporto Ispra 2013)

In Italia, la raccolta pro-capite del 2012 (48,9 kg/ab) registra un leggero calo rispetto al valore del 2011, con una contrazione (-1,7 kg/ab) non omogenea nelle tre macroaree: è infatti al Nord che il calo dei volumi è più sentito (-3,2%), seguito dal Sud (-1,5%) e dal Centro (-0,5%); nel 2012 il tasso di recupero complessivo ha raggiunto il 91,9% (Rapporto Comieco).

I rifiuti di imballaggio rappresentano la frazione maggiormente recuperata nel 2011 (Figura 3.2), costituendo il 45 % del totale recuperato (Rapporto ISPRA 2013).

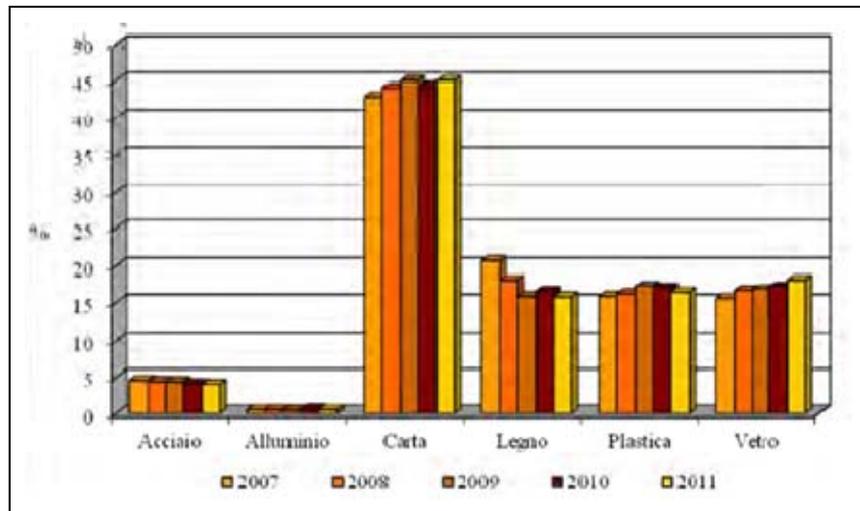


Figura 3.2- Distribuzione percentuale del recupero dei rifiuti da imballaggio, anni 2007-2011. (Rapporto ISPRA 2013)

La quantità totale recuperata di imballaggi cellulosici, nel 2011, ammonta a circa 3,9 milioni di tonnellate, pari ad una percentuale di recupero totale sull'immesso al consumo dell'87,5%. La frazione avviata a riciclaggio, oltre 3,5 milioni di tonnellate, contribuisce, in maniera rilevante, al recupero complessivo degli imballaggi cellulosici costituendo il 79,5% dell'immesso al consumo (Tabella 3.2). Rispetto al 2010, i rifiuti di imballaggio cellulosici avviati al riciclo risultano in aumento di quasi 110 mila tonnellate (+3,2%), mentre quelli recuperati come energia, corrispondenti all'8% dell'immesso al consumo, risultano sostanzialmente invariati (ISPRA, 2013).

**Tabella 3.2 - Immesso al consumo, riciclaggio e recupero degli imballaggi cellulosici (1.000\*tonnellate), anni 2000–2011 (ISPRA – COMIECO, 2013)**

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Immesso al consumo	4.167	4.160	4.218	4.208	4.333	4.333	4.470	4.536	4.501	4.092	4.338	4.436
Riciclaggio	1.843	2.109	2.369	2.432	2.703	2.875	2.931	3.218	3.323	3.291	3.416	3.526
Recupero di energia	150	190	120	341	421	444	401	376	356	328	361	355
<b>Recupero totale</b>	<b>1.993</b>	<b>2.299</b>	<b>2.489</b>	<b>2.773</b>	<b>3.124</b>	<b>3.319</b>	<b>3.332</b>	<b>3.594</b>	<b>3.679</b>	<b>3.619</b>	<b>3.778</b>	<b>3.881</b>
% Riciclaggio	44,2	50,7	56,2	57,8	62,4	66,4	65,6	70,9	73,8	80,4	78,7	79,5
% Recupero di energia	3,6	4,6	2,8	8,1	9,7	10,2	9,0	8,3	7,9	8,0	8,3	8,0
<b>% Recupero totale</b>	<b>47,8</b>	<b>55,3</b>	<b>59,0</b>	<b>65,9</b>	<b>72,1</b>	<b>76,6</b>	<b>74,5</b>	<b>79,2</b>	<b>81,7</b>	<b>88,4</b>	<b>87,1</b>	<b>87,5</b>

Oltre al riciclaggio e al recupero di energia, la carta (se non inchiostrata) può anche essere sottoposta a una degradazione aerobica (compostaggio) assieme ad altri materiali di origine vegetale e/o animale per produrre un ammendante utile per l'agricoltura.

### 3.1 TECNOLOGIE CONVENZIONALI PER IL RECUPERO DELLA CARTA

L'utilizzo in cartiera per la produzione di carta e cartone riciclati si configura come la principale forma di gestione del materiale cellulosico immesso al consumo, come deducibile dal grafico riportato in Figura 3.3 (COMIECO, 2012).

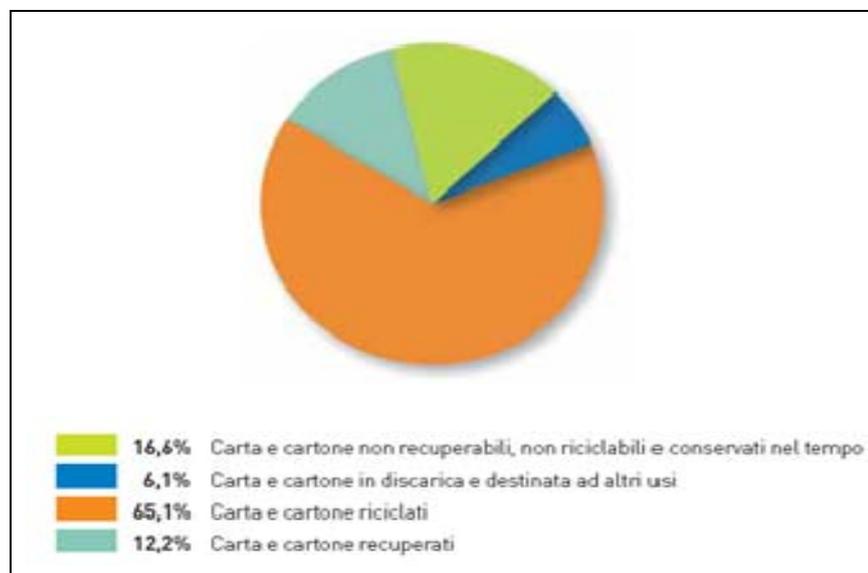


Figura 3.3 - Destino dei prodotti in carta e cartone immessi al consumo in Italia nel 2012 (COMIECO, 2012).

I prodotti cartari possono essere suddivisi in 6 grandi categorie:

1. carta da stampa, che viene utilizzata per giornali e guide telefoniche, depliant, stampa in offset e anche per carte speciali (carte geografiche, carta moneta e per assegni);
2. carta da scrivere e per ufficio, che comprende carta per buste, per quaderni, carta per disegno, fax, fotocopie, etc.;
3. carta da imballaggio, comprende carta *kraft*, crespata e per sacchetti, carta per alimenti, carta pergamena, carta accoppiata con plastica;
4. cartoni e cartoncini;
5. articoli igienico-sanitari;
6. carta per uso industriale e varie.

La carta e il cartone provenienti dalla raccolta differenziata confluiscono in piattaforme dove subiscono una prima fase di selezione, mediante la quale si realizza la separazione dei diversi materiali cellulosici (giornali, cartoni, carta più leggera), e delle frazioni merceologiche estranee (f.m.e.) quali vetro, plastica, metalli, inerti, etc.

La fase successiva alla separazione prevede la pressatura del materiale in balle destinate alle cartiere dove, macerate e mescolate in quantità

variabili a fibre vergini, danno origine ad una pasta omogenea, poi impiegata per la produzione di nuova carta e cartone.

All'interno delle cartiere, il recupero della carta da macero è strutturato secondo le seguenti fasi di lavorazione (Smook 1982):

- **Spappolamento** (repulping): il processo di riciclo vero e proprio inizia con l'introduzione dei materiali recuperati all'interno del pulper, un macchinario dotato di pale rotanti che, con l'apporto di acqua calda, rompe i legami esistenti tra le fibre, trasformando la carta in una poltiglia. Sul fondo del pulper è situato un filtro a grossi fori, una griglia che trattiene le impurità più grossolane, facendo passare le fibre, che vengono ulteriormente ridotte.
- **Depurazione**: successivamente, il macero viene convogliato all'interno di un depuratore che, sfruttando la forza di gravità e la differenza di peso specifico, separa la pasta di cellulosa dalle impurità ancora presenti. Per separare i materiali estranei dalla sospensione acquosa vengono utilizzate delle setacciatrici con maglie grandi fino a 0,25 mm e degli idrocycloni che separano le particelle più grandi. Le operazioni effettuate durante la fase di depurazione del macero producono rifiuti (i cosiddetti scarti di pulper) che dovranno essere smaltiti. Questi sono rappresentati dalle frazioni insolubili (pezzetti di plastiche, metalli) e dalle fibre non adatte ad essere riciclate. La quantità di questi residui dipende dal grado di purezza del macero di partenza.
- **Deinchiostrazione**: a questo punto, si procede con l'eliminazione di tutte le sostanze ancora presenti nelle fibre, quali inchiostro, collanti e accoppiati vari. Queste sostanze vengono disciolte o separate, eventualmente con l'ausilio di additivi chimici o mediante vapore.

Le fasi di depurazione e deinchiostrazione sono attualmente quelle più strettamente legate ai limiti tecnici del processo di riciclo, poiché la presenza dei leganti chimici utilizzati nel precedente ciclo di produzione rendono difficile il trattamento finale delle fibre; basti pensare che per gli inchiostri non vi sono ancora processi in grado di eliminarli del tutto senza compromettere pesantemente la qualità delle fibre ottenute (COMIECO, 2003).

Per la carta da macero stampata la deinchiostrazione viene effettuata in due fasi: la prima avviene utilizzando una vasca di flottazione, all'interno della quale viene generata una schiuma mediante iniezione di aria in presenza di additivi chimici e soda caustica, con aggiunta di silicato di

sodio e perossido di idrogeno per migliorare la lucentezza ed il grado di bianco. Durante questa fase, l'efficienza del processo è incrementato mediante la circolazione del liquido dall'alto al basso della vasca.

Successivamente, la sospensione di fibre deinchiostrata viene ulteriormente diluita per essere sottoposta alla fase di "setacciatura", al fine di rimuovere impurità di piccole dimensioni.

Il materiale viene quindi inviato in un cilindro ispessitore, prima dello stadio di dispersione. Il materiale ispessito viene progressivamente disidratato per essere preparato alla fase di impasto, dove vengono rotti i legami tra l'inchiostro e le fibre della carta stampata.

Infine, il materiale ottenuto viene inserito in un secondo cilindro ispessitore e inviato alla fase di miscelazione con gli altri materiali costituenti l'impasto.

La pasta proveniente dalla carta da macero viene infine mescolata alla cellulosa vergine (in proporzioni diverse, rispetto alla destinazione d'uso del materiale finale) e il ciclo di produzione prosegue in modo analogo a quello impiegato per le materie prime tradizionali. Nella Figura 3.4 è schematizzato il convenzionale ciclo di processo di una cartiera.

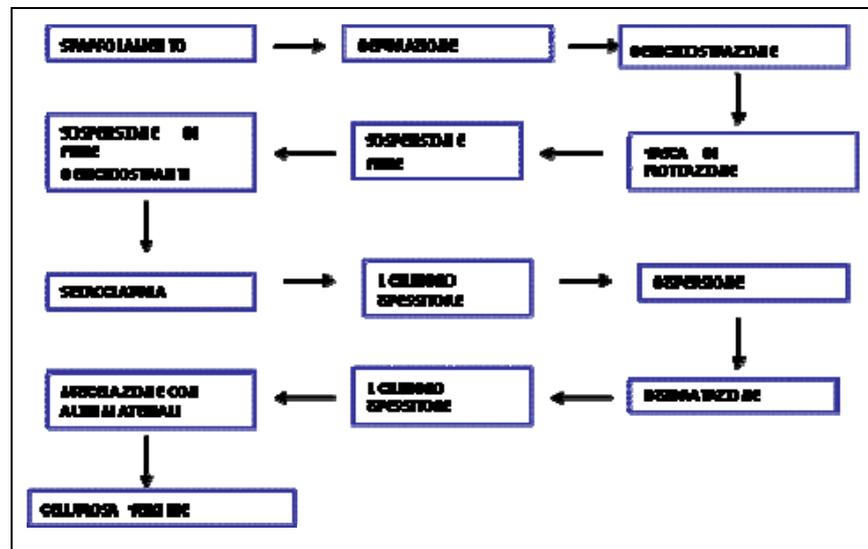


Figura 3.4- Schema del Ciclo di cartiera

Per migliorare le caratteristiche della nuova carta o per conferirle particolari proprietà (maggiore resistenza, colore), alla pasta vengono

spesso aggiunti additivi, quali sostanze aggreganti collose o coloranti, a seconda della destinazione d'uso dei prodotti finali.

I prodotti derivanti dalla filiera del riciclo sono svariati, tra gli altri si annoverano: il cartone ondulato, il cartoncino teso, la carta igienica, le bobine di carta da stampa.

### **3.2 IL RIUTILIZZO ALTERNATIVO DEI RIFIUTI CELLULOSICI**

A fronte del crescente livello di intercettazione di rifiuti cellulosici evidenziato negli ultimi anni, il mercato del macero sembra incorrere, invece, verso prospettive incerte, determinate dalla crescente attenzione verso il recupero di materia manifestata dai paesi orientali, che hanno rappresentato, per anni, i principali importatori dei surplus di macero provenienti dai Paesi Europei.

Si stima, infatti, che entro il prossimo decennio, con l'incremento delle percentuali di differenziazione dei rifiuti cellulosici, la Cina sarebbe in grado di soddisfare il fabbisogno di macero degli impianti esistenti, con conseguente stallo delle esportazioni di macero europee.

Anche in risposta a tali dinamiche, negli ultimi anni, l'attenzione del mondo tecnico appare rivolta verso la ricerca di nuove forme di recupero, alternative al conferimento in cartiera, indirizzate soprattutto alle frazioni di scarso pregio, quali la carta di giornali e riviste. Per questa tipologia di rifiuti, infatti, la tendenza attuale è quella di implementare a trattamenti "a freddo", finalizzati alla produzione di materiali destinati a sostituire, del tutto o in parte, alcuni prodotti presenti in modo consolidato sul mercato. Un esempio in tal senso è rappresentato dalla produzione di isolanti termici a partire dai materiali di scarto della filiera di riciclaggio della carta (Sutcu, et al., 2009) o di combustibili domestici, generati dalla pressatura dei quotidiani in bricchette.

Altra opzione alternativa di recupero è rappresentata dalla produzione di lettiere per animali domestici e/o stabulazioni oppure dall'impiego della carta dei quotidiani come adsorbente non convenzionale per la rimozione di metalli tossici (cromo esavalente) da soluzioni acquose contaminate (Wang et al., 2009; Vincenti, 2003).

In particolare, una delle forme alternative di recupero, riscontrabile in ambito tecnico-industriale, prevede l'impiego di carta grafica come materia prima per la produzione di lettieri animali, dette "eco lettieri".

Tale soluzione risulta coerente con le nuove prospettive commerciali di settore, che sembra essere proiettato verso scelte più sostenibili sotto il profilo ambientale. Negli ultimi anni, infatti, la tendenza è quella di realizzare le lettieri con materiali biodegradabili o anche risultanti dal recupero dei rifiuti.

Un esempio in tal senso è rappresentato dalle lettieri in carta riciclata, prodotte a partire da materiale celluloso di scarto e adoperate principalmente per i piccoli animali domestici (Swinker et al. 1997, Garlipp et al. 2011).

In commercio esistono diversi tipi di lettieri realizzate con materiale celluloso (Tabella 3.3), le quali si differenziano tra loro per forma fisica e composizione.

**Tabella 3.3- Le lettieri in carta riciclata presenti sul mercato**

Nome prodotto	Azienda	Caratteristiche dichiarate
Yesterday News	Nestlé-Purina (Svizzera)	Carta di giornali e riviste (> 99 %)
Fresh News	Bio-Fresh Environmental Ltd (UK)	Carta riciclata(100%)
PaPurr Scoop	PaPurr (USA)	Carta riciclata (100%) senza aggiunta di additivi
Premium Ferret litter	Marshall (UK)	Carta riciclata (100%)
BreederCelect o BreederChoice	FibreCycle TM (Australia)	Carta riciclata (>99%) senza aggiunta di additivi (non pellettizzata)
Cat Litter	Qingdao Broadchem Industrial Co., Ltd (Cina)	Carta riciclata

Le lettieri sono generalmente composte da argilla, carta riciclata, o materiale silicico granulare. L'efficienza di una lettiera viene misurata valutando la capacità di ridurre le emissioni di ammoniaca dal materiale (Andersson M. 1996) nelle 48 ore, in quanto tali lettieri destinate a piccoli animali, vengono utilizzate in ambienti indoor.

Nelle lettieri, l'ammonio,  $\text{NH}_4^*$ , prodotto dall'idrolisi dell'urea nelle urine può essere convertito in ammoniaca,  $\text{NH}_3$ , stabilizzato attraverso una sintesi microbiologica, oppure ossidato attraverso nitrificazione e

successivamente, in alcuni casi, ridotto attraverso denitrificazione (Groenestein et al. 1993; Garlipp et al., 2011)).

Per migliorare l'immobilizzazione microbica dell'azoto e ridurre la volatilizzazione dell'ammoniaca, il substrato che si utilizza come lettiera deve avere le seguenti caratteristiche (Andersson M. 1996):

- un alto rapporto C/N;
- il carbonio deve essere in una forma che può essere rapidamente metabolizzato dai microrganismi;
- il substrato dovrebbe idealmente rendere disponibile le due forme di carbonio uno rapidamente e l'altro lentamente.

Tra le varie eco-lettiere presenti in letteratura, un primo esempio è rappresentato, dalla lettiera prodotta da *Ralston Purina Company* (US Patent 6 276 300B1, 2001), formata da una varietà di materiali granulari; la lettiera è concepita per piccoli animali domestici.

Questo tipo di lettiera è costituita principalmente da:

- segatura;
- setacci molecolari di zeoliti, per aumentare la capacità assorbente del materiale;
- carta, la cui componente non è restrittiva, infatti può essere utilizzata qualsiasi tipo di carta.

Oltre alle zeoliti, in questa lettiera si può aggiungere anche altro materiale assorbente supplementare, come lo sfagno (*Sphagnum*), che è un tipo di muschio con alto grado di assorbimento.

Questa eco-lettiera presenta la seguente composizione:

- da circa il 30% al 95% in volume di carta;
- da circa 1% a 50% in volume di materiale assorbente;
- da circa 1% a 10% in volume di setaccio molecolare di zeolite;
- da circa 3% al 50% in volume di argilla.

La carta utilizzata per la realizzazione della lettiera comprende anche carta riciclata.

Come si può osservare nella figura seguente, gli elementi che compongono la lettiera hanno una forma cilindrica con una lunghezza che va da circa 0,6cm a circa 5 cm, mentre il diametro è compreso tra circa 0,6cm a circa 2cm.

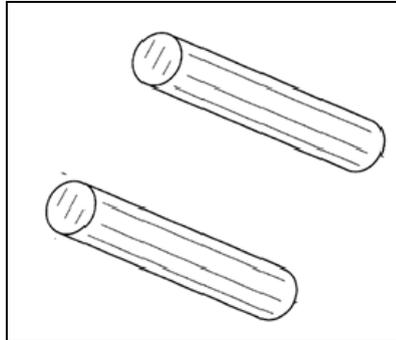


Figura 3.5- Particolare dei singoli elementi della eco-lettieria (US Patent 6 276 300B1)

In commercio è possibile trovare differenti composizioni degli elementi cilindrici costituenti la lettiera (vedi figura 3.7)

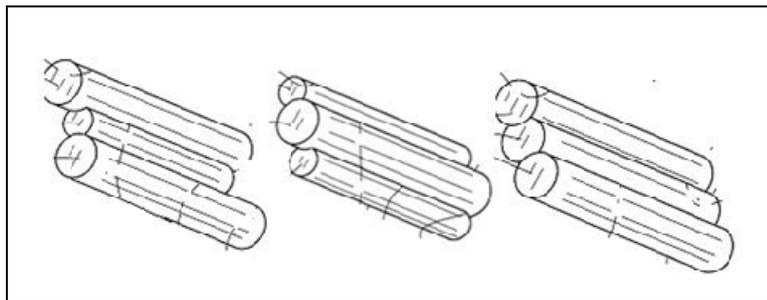


Figura 3.6- Tipi di elementi di lettiera in commercio (US Patent 6 276 300B1)

Oltre alle componenti principali, sopra elencate, nella lettiera sono presenti altri componenti, quali ad esempio:

- agenti antimicrobici per ridurre la crescita batterica nella lettiera;
- sostanze chimiche come Quinine Dihydrochloride per evitare che l'animale possa mangiare la lettiera,;
- fragranze per coprire l'odore degli escrementi animali. Le fragranze utilizzate possono essere di vario tipo: trifoglio; legno, spezie varie, etc., la cui percentuale in peso è compresa tra 0.05 – 0.3%.

Un secondo tipo di lettiera a base di carta, adatta ad essere utilizzata per piccoli animali, è prodotto dalla *Buffalo Grove* (US Patent 2010/0006035, 2010). Questa lettiera presenta una grande area superficiale e un'alta capacità di assorbimento dell'umidità.

La lettiera è composta principalmente da:

- dal 15% al 40% in peso da legno (segatura, trucioli di legno o materiale in legno sfibrato);
- da 60% a 85% in peso di carta finemente sminuzzata (giornali a brandelli);
- dallo 0,1% allo 0,5% in peso di tensioattivi;
- dallo 0,1% a 1% in peso di sostanze deodoranti.

Il legno e i materiali cartacei possono essere miscelati con della bentonite per migliorare la capacità assorbente.

Nella figura seguente è riportato uno schema del processo di produzione di questa eco lettiera.

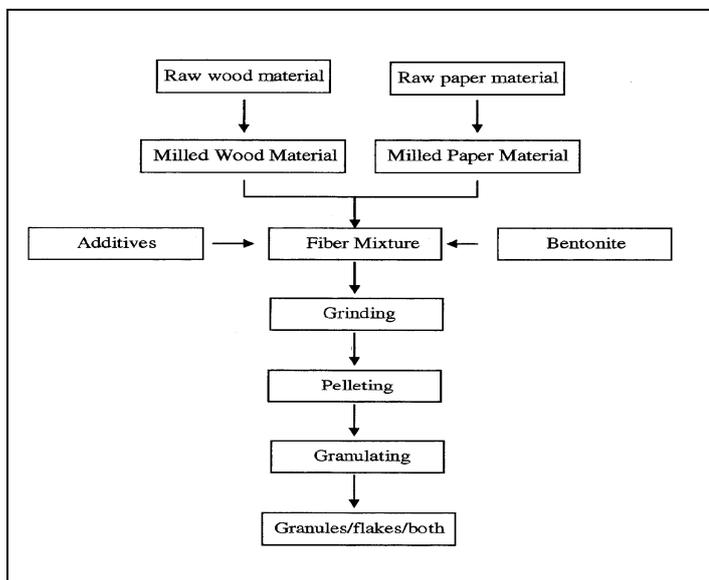


Figura 3.7- Processo di produzione della lettiera US Patent 2010/0006035

A questo tipo di lettiera viene aggiunto un agente tensioattivo che può aumentare la capacità di trattenere l'umidità fino a 4-5 volte il suo peso. Questi tensioattivi o surfactanti sono sostanze che hanno la proprietà di abbassare la tensione superficiale di un liquido, agevolando la bagnabilità delle superfici o la miscibilità tra liquidi diversi. I tensioattivi sono in grado di aumentare la ritenzione idrica e la velocità di assorbimento delle fibre di carta e legno e possono essere cationici, anionici, zwitteronici o non ionici. Esempi di surfactanti ionici economici e disponibili sul mercato sono il solfonato di naftalina e l'alchilbenzene solfonato (ABS).

All'interno della lettiera possono essere aggiunte anche:

- sostanze deodoranti in concentrazione adeguata;
- ulteriori materiali organici o sintetici o assorbenti per ridurre l'umidità e controllare gli odori.

Gli agenti utilizzati per il controllo degli odori possono essere liberi o incapsulati per evitare una prematura dispersione nell'atmosfera delle fragranze.

La lettiera prodotta dalla *Buffalo Grove* presenta un pH leggermente acido, compreso tra 3,5 e 4,5, per poter controllare la quantità di ammoniaca,  $\text{NH}_3$ , rilasciata dalle urine animali assorbite dalla lettiera. La scelta dell'acido utilizzato per aggiustare il pH deve essere bilanciato con il tensioattivo e la sostanza deodorante utilizzata per la costituzione della lettiera.

Il valore di pH e la capacità di scambio ionico (CEC) della lettiera possono influenzare la capacità di ralscio degli ioni ammonio dal materiale (Freney J.R, et al. 1983, Misselbrook T.H., et al, 2005).

Nello studio condotto da Misselbrook et al nel 2005, viene studiata l'emissione di  $\text{NH}_3$  per sei differenti materiale utilizzati come lettiera: paglia di grano tritata, sabbia, trucioli di pino, pezzi giornali, steli di mais tritati e concime caseario riciclato. Si riporta nella figura seguente, la tabella con i dati relativi alla diversa capacità dei sei materiale di rilasciare  $\text{NH}_3$ .

**Tabella 3.4- capacità di assorbire urina dei sei differenti materiali usati come lettiera e emissione di  $\text{NH}_3$  nelle 48h (Misselbrook T.H., et al, 2005)**

	Chopped straw	Sand	Fine shavings	Chopped newspaper	Chopped corn stalks	Recycled manure solids	SED <sup>1</sup>
Absorbance, g of urine/g of dry bedding	2.85 <sup>a</sup>	0.22 <sup>d</sup>	2.63 <sup>c</sup>	3.59 <sup>b</sup>	2.77 <sup>c</sup>	4.22 <sup>b</sup>	0.15
Total urine N added to chamber, <sup>2</sup> g/m <sup>2</sup>	11.8 <sup>c</sup>	30.0 <sup>b</sup>	14.6 <sup>c</sup>	24.4 <sup>b</sup>	16.2 <sup>c</sup>	37.4 <sup>a</sup>	3.2
$\text{NH}_3$ emission, g of $\text{NH}_3$ /m <sup>2</sup>	4.7 <sup>c</sup>	10.9 <sup>b</sup>	7.6 <sup>c</sup>	10.0 <sup>b</sup>	7.7 <sup>c</sup>	18.3 <sup>a</sup>	1.9
$\text{NH}_3$ emission, % of urine N	40	36	55	46	43	50	10
Urine N remaining on bedding after 48 h, mg/g of dry bedding	12.8 <sup>b</sup>	1.3 <sup>b</sup>	9.2 <sup>a</sup>	15.6 <sup>a</sup>	11.6 <sup>a</sup>	16.2 <sup>a</sup>	3.2

SED= standard error

La lettiera per animali deve essere cambiata spesso perché dopo un certo periodo il materiale assorbente emana odore sgradevole dovuto alla presenza di urine e feci di animale.

Un altro esempio di lettiera in materiale cellulosico è costituito dal brevetto US Patent 4 263 873 del 1981. La lettiera prodotta è costituita di cellulosa a cui viene aggiunta una sostanza chimica con caratteristiche

simile al feromone che la rende “attraattiva” per gli animali che cercano un luogo per urinare e/o defecare. La caratterista estetica della lettiera è rappresentata dai suoi elementi pellettizzati, per dare alla stessa una consistenza quanto più simile alla ghiaia fine.

I pellet sono costituiti principalmente da carta straccia, quindi libri, riviste e tutti i tipi di carta ad eccezione di quelle con un alto contenuto di argilla.

In particolare, nei pellets oltre al materiale cellulosico si trova la terra, i due elementi sono legati insieme con una quantità sufficiente di acqua tale da non rendere umidi i pellets. Inoltre viene aggiunto un sale acido in soluzione o in polvere capace di neutralizzare l'urina degli animali, mantenendo accettabile il valore di pH della lettiera.

Per quanto riguarda la densità, il valore ottimale della lettiera è di  $1\text{ cm}^3/\text{g}$ ; in generale il range preferibile è tra  $0.75 - 1.1\text{ cm}^3/\text{g}$ . Se il valore della lettiera è:

- $<0.75\text{ cm}^3/\text{g}$  i pellets sono troppo fragili e pertanto una volta adoperata rimane appesa alle zampe dell'animale;
- $>1.1\text{ cm}^3/\text{g}$  i pellets diventano vitrei, molto simili al carbone e di conseguenza difficili da smaltire nella rete fognaria.

Le dimensioni dei pellets ottimali sono:

- diametro di 0.5 cm
- lunghezza 1.2 cm.

In generale è stata assegnata una dimensione di riferimento perché con tale diametro e lunghezza il pellet arriva ad avere una struttura simile a quella del suolo, diviene capace di trattenere la polvere e infine risulta più facile lo smaltimento.

I valori di umidità dovrebbero rientrare nell'intervallo di 15-16% in peso secco della lettiera. È importante rispettare un livello prossimo a questo range per poter garantire l'integrità strutturale dei pellets.

## 4 IL TRATTAMENTO DELLA FRAZIONE ORGANICA

La frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) costituisce l'aliquota preponderante del monte rifiuti prodotto, variabile tra il 34 ed il 47% del quantitativo complessivamente prodotto in Europa (IPPC, 2006).

La profonda diversificazione delle caratteristiche legate a substrati indifferenziati da quelli provenienti da raccolte differenziate, si riflette sui trattamenti cui la frazione organica viene sottoposta a valle della sua intercettazione.

La Figura 4.1 evidenzia le possibili alternative di trattamento della FORSU. Tuttavia, in virtù delle caratteristiche di fermentescibilità di questa matrice, i processi biologici, sia di tipo aerobico che anaerobico, rappresentano l'opzione di trattamento da perseguire per garantire la sostenibilità della gestione di tale substrato (Arafat et al., 2013; Menikpura et al., 2013).

In particolare, i trattamenti biologici aerobici della FORSU selezionata meccanicamente dal rifiuto indifferenziato sono, tipicamente implementati mediante processi di biostabilizzazione oppure di bioessiccazione.

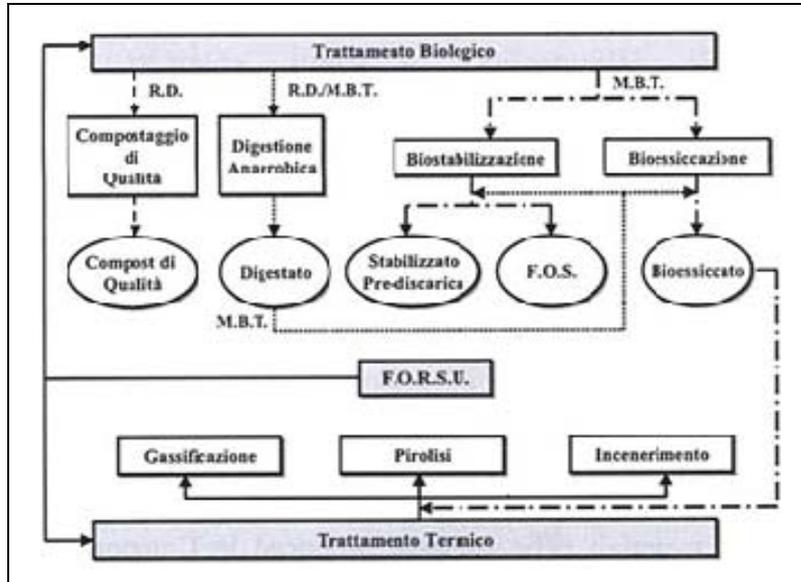


Figura 4.1 - Opzioni di trattamento della FORSU

## 4.1 IL COMPOSTAGGIO DI QUALITÀ

Gli impianti di compostaggio sono impianti di trattamento aerobico controllato della frazione organica biodegradabile raccolta in modo differenziato, finalizzati alla produzione di compost. Il prodotto finale (compost di qualità) è commercializzabile, collocabile sul mercato e destinato per usi agricoli ed ortoflorovivaistici, qualora rispetti i requisiti delle normative di settore.

Nella figura seguente viene mostrata la composizione percentuale delle diverse tipologie di rifiuti trattati in un impianto di compostaggio.

Il compostaggio è un processo di bio-conversione aerobica che applicato ai rifiuti solidi urbani ne trasforma la frazione organica biodegradabile in un fertilizzante organico unificato, detto compost, sfruttando l'azione della flora microbica spontaneamente presente nel rifiuto stesso.

Il processo di compostaggio può essere suddiviso in due fasi:

1. Fase attiva o di bioossidazione accelerata, in cui sono più intensi e rapidi i processi degradativi a carico delle componenti organiche maggiormente fermentescibili; in questa fase, che si svolge tipicamente in condizioni termofile, si raggiungono elevate

temperature, si palesa la necessità di drenaggio dell'eccesso di calore dal sistema e si ha una elevata richiesta di ossigeno necessario alle reazioni biochimiche;

2. Fase di maturazione, in cui si completano i fenomeni degradativi a carico delle molecole meno reattive ed in cui intervengono reazioni di trasformazione e polimerizzazione a carico delle stesse che portano alla "sintesi" delle sostanze humiche. Sia le esigenze di drenaggio di calore che quelle di adduzione di ossigeno al sistema sono minori rispetto alla fase attiva.

I principali fattori di controllo del processo, che garantiscono le ottimali condizioni di sviluppo della microflora e che consentono di accelerare le reazioni di decomposizione-trasformazione, sono discussi di seguito.

### Concentrazione di ossigeno

La permanenza della concentrazione di ossigeno a livelli superiori al 15% garantisce il perdurare delle condizioni di perfetta aerobiosi indispensabile per l'accelerazione del metabolismo batterico aerobico; ciò a sua volta consente di ridurre i fenomeni putrefattivi; il flusso di aria deputato all'adduzione di ossigeno all'interno della massa di rifiuti in compostaggio garantisce l'asportazione del calore in eccesso e l'allontanamento dell'eccesso di umidità sotto forma di vapore acqueo. Il tasso di consumo di ossigeno può essere approssimativamente stimato tramite la seguente relazione, dove la frazione organica del rifiuto viene espressa in termini di solidi volatili (SV):

$$W_{O_2} = a * Y^{b * T}$$

dove:

$W_{O_2}$  = tasso di consumo di ossigeno, g/kg SV\*h

$a = 0,07 \div 0,1$

$Y = 10 \div 16$

$B = 0,028 \div 0,031$

$T$  = temperatura, °C

Il tasso di consumo di ossigeno può variare in funzione della tipologia dei rifiuti, cioè in relazione al contenuto in solidi volatili (SV). Senza una sufficiente ossigenazione, la biomassa substrato diviene anossica e la microflora microbica anaerobica prende il sopravvento, portando

l'accumulo di composti ridotti (esempio acidi grassi volatili, H<sub>2</sub>S, etc.) caratterizzati da odore aggressivo ed elevata fitotossicità.

### Temperatura.

La temperatura si innalza come conseguenza del calore biogeno sviluppato dai processi degradativi; il suo accumulo nella massa dipende dall'equilibrio tra sviluppo di calore (legato alla fermentescibilità) e dispersione di calore (legato alle dimensioni della massa ed alla sua umidità). Nella fase attiva, con biomasse non eccessivamente umide e cumuli di dimensioni adeguate, la temperatura può anche superare agevolmente i 70°C, garantendo in tal modo le condizioni per la igienizzazione del materiale (3 giorni a 55°C per la legislazione italiana); le condizioni termometriche ottimali per i processi di stabilizzazione sono invece quelle tendenzialmente mesofile (circa 40-45°C) (Figura 4.2).

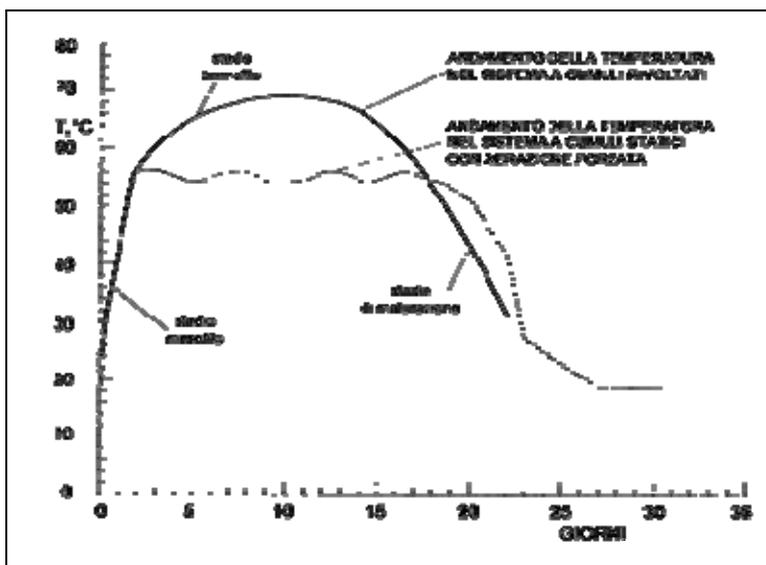


Figura 4.2- Andamento della temperatura nel corso del processo di stabilizzazione aerobica (D'Antonio .)

Per tale motivo è opportuno adottare sistemi di rimozione del calore in eccesso, utilizzando i flussi d'aria naturali (per diffusione e convezione) o indotti (sistemi di aereazione forzata della biomassa). Poiché il rilascio di calore è direttamente correlato all'attività microbica ossidativa, la temperatura è un ottimo indicatore di processo. Per tenere la temperatura sotto controllo, occorre adottare sistemi di aereazione, come

la ventilazione forzata o il rivoltamento dei cumuli, che consentono alla biomassa in trasformazione di perdere continuamente calore grazie all'evaporazione dell'acqua ed ai movimenti d'aria che rimuovono il vapore acqueo ed i gas caldi dal substrato.

### Umidità

Tale parametro è indispensabile per lo sviluppo microbico che risente fortemente sia di eccessi di umidità (con rischio di occupazione totale della porosità della biomassa da parte dell'acqua, e dunque di anaerobiosi del sistema) che di mancanza (che comporta la stasi di processi degradativi). I valori ottimali di umidità della massa, riportati nella tabella seguente, tendono a decrescere con il procedere dei processi di stabilizzazione e conseguentemente con il decremento delle attività biologiche a carico della massa in trasformazione.

**Tabella 4.1 – Range ottimale di umidità**

Settimana	Range ottimale di umidità
1	55-65
2	53-60
3	50-57
4	46-51
5	42-47
6	38-43
7	35-40
successive	35-40

Il materiale iniziale deve invece presentare un'umidità relativamente elevata per esaltare le funzioni di termoregolazione collegate all'evaporazione della stessa ed evitare al contempo disseccamenti precoci. Poiché nel corso del processo di compostaggio il rifiuto accusa una forte perdita di acqua sotto forma di vapore, va sempre assicurata un'umidità sufficiente, intervenendo eventualmente con periodiche irrigazioni.

## pH

I valori ottimali ricadono nell'intervallo tra 6,5 e 8, tuttavia la naturale capacità tampone del processo rende possibile l'impiego di substrati con pH compresi in un ben più ampio spettro.

## Nutrienti

Sotto tale profilo è importante il ruolo giocato dal rapporto C/N, che esprime il rapporto tra le sostanze che forniscono ai microrganismi energia per le loro reazioni metaboliche e materiali plastici per la loro moltiplicazione. Il rapporto C/N ideale è compreso tra 20 e 30 unità, tendendo presente che ogni scostamento medio da questi valori porta a carenze o eccessi che condizionano fortemente le attività biologiche, determinando una massiccia perdita di azoto o un rallentamento delle reazioni metaboliche. Di seguito si riportano valori tipici del rapporto C/N di alcuni prodotti utilizzati nel processo di compostaggio (Epstein 1997, ARPA Veneto 2002).

Tabella 4.2 – Rapporto C/N di diverse matrici organiche (ARPA Veneto 2002)

MATERIALE ORGANICO	C/N
FOGLIE	35-85
CORTECCHE CONIFERE	150
CORTECCHE DI PIOPPO	80
SEGATURA E TRUCIOLC	150
CARTA	100
PAGLIA E STOCCHI	50
RESIDUI POTATURA	30
SCARTI MERCATALI	20
SFALCI DI PRATO	20
FRAZIONE SOLIDA LIQU	30
FRAZIONE SOLIDA LIQU	60
FRAZIONE SOLIDA LIQU	10
LETAME BOVINO	25
POLLINA GALLINE OVA	8
LETTIERA POLLI CARNE	12
FANGHI URBANI	6
FANGHI AGROINDUSTR	6
FORSU	12

Il controllo su questo parametro non rientra in genere nella consuetudine operativa degli impianti, pur aiutando l'interpretazione di certi fenomeni (ad esempio la difficoltà di avvio della fase termofila per alto rapporto C/N) laddove questi si presentino.

### Microbiologia

Il processo di compostaggio, essendo un processo biologico, coinvolge una serie di microorganismi i quali degradano la sostanza organica e i composti organici. Molti sono i fattori che regolano tale attività microbica come, ad esempio, il contenuto di ossigeno, l'umidità, la temperatura, l'apporto di nutrienti e il pH. Data la complessità della natura della sostanza organica e dei composti organici presenti nella miscela, numerosi sono i microrganismi coinvolti nel processo di degradazione.

### Porosità, struttura e pezzatura del materiale

Queste caratteristiche condizionano il processo di stabilizzazione in quanto influenzano l'aerazione permettendo o meno la diffusione dell'ossigeno e quindi l'avvenimento delle reazioni. Attraverso operazioni di sminuzzamento e di triturazione della matrice organica, tali proprietà possono essere corrette.

Uno dei presupposti fondamentali per attuare un efficiente programma di compostaggio è quello di partire da una corretta combinazione degli ingredienti che formano il substrato organico di partenza. Nella tabella seguente vengono riportati i valori ottimali relativi ad alcuni parametri raccomandati anche a livello di caratteristiche del substrato di partenza, per favorire il processo di compostaggio (ANPA 2002).

**Tabella 4.3- Condizioni del substrato raccomandate per una buona gestione del processo di compostaggio (ANPA 2002).**

Parametro	Intervallo di compatibilità	Intervallo ottimale
Rapporto C/N	20:1 -40:1	25:1-30:1
Umidità	45-65%	57-63%
Concentrazione di O <sub>2</sub>	≥5%	≥10%
Dimensione delle particelle (cm)	0,5- 5,0	Variabile
pH	5,5-9,0	6,5-8,5
Temperatura di processo (°C)	25-70	35-60
Densità apparente	≤750	≤650

Nella preparazione della matrice organica da avviare al compostaggio, vengono, di solito, considerate tre componenti: il substrato principale, l'eventuale correttivo o additivo per il bilanciamento dei parametri

edafici (esempio nutrienti, salinità) e l'agente di supporto (*bulking agent*). È considerato correttivo un qualsiasi materiale che, aggiunto in quantità modeste rispetto al substrato principale, serve ad integrare elementi nutrienti scarsi o assenti (ARPA Veneto 2002). L'agente di supporto è invece un materiale ligno-cellulosico, da moderatamente resistente a refrattario alla biodegradazione, la cui funzione principale è quella di fornire struttura e porosità alla miscela di partenza (ARPA Veneto 2002). Per il compostaggio della frazione organica proveniente dalla raccolta differenziata del rifiuto solido urbano, Eftoda e McCartney in un lavoro del 2004 hanno suggerito un rapporto di organico e trucioli di legno pari a 1:2,5 in modo tale da garantire un ottimo livello di aereazione. Inoltre si è visto come trucioli di legno con una dimensione inferiore a 5mm portino ad una minore perdita di umidità rispetto a trucioli di dimensioni superiori ai 40mm in quanto presentano una maggiore resistenza alla ventilazione (Raichura e McCartney, 2006).

## 4.2 LA DIGESTIONE ANAEROBICA

La digestione anaerobica è un processo biologico complesso per mezzo del quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica viene trasformata in biogas, una miscela costituita principalmente da metano e CO<sub>2</sub>. La percentuale di metano nel biogas varia a seconda del tipo di sostanza organica digerita la conversione a biogas, può variare dal 40 % ad oltre il 90%, in ragione della tipologia di substrato, della sua biodegradabilità e delle condizioni di processo. I valori più comuni si collocano tra il 40 % ed il 60% (Malpei e Gardoni, 2008).

Il potere calorifico del biogas, funzione del tenore di metano, è mediamente compreso tra 20.000 e 24.000 kJ Nm<sup>-3</sup>.

Negli ultimi quindici anni, sono stati condotti molti studi sulla digestione anaerobica, sia a scala pilota che di laboratorio, nell'ambito dei quali sono state impiegate diverse tipologie di rifiuti (Dong et al., 2009):

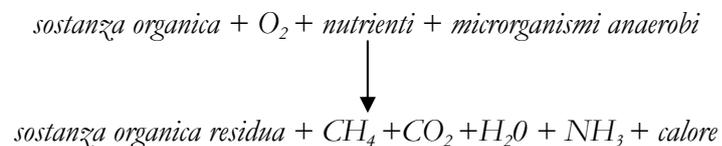
- rifiuti mercatali (Nguyen et al., 2007)
- rifiuti da frutta e verdura (Bouallagui et al., 2005)
- rifiuti da utenze domestiche (Krzystek et al., 2001)
- rifiuti da cucina (Rao e Singh, 2004)

- frazione organica dei rifiuti solidi urbani da selezione meccanica (MS-OFMSW) (Charles et al., 2009)
- frazione organica dei rifiuti solidi urbani selezionati alla fonte (Davisson et al., 2007)

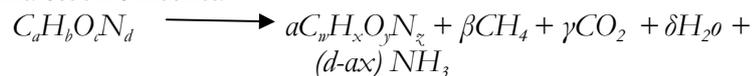
Il processo è svolto da un consorzio batterico e comprende una serie di reazioni biodegradative, la più lenta delle quali determina il passaggio limitante il processo. Nessun ceppo batterico è in grado di condurre autonomamente la completa degradazione anaerobica della sostanza organica; ciascuna popolazione, quindi, ha un ruolo ben definito nella demolizione della sostanza organica, producendo come cataboliti degli intermedi di reazione che fungono da substrato per la popolazione successiva nella catena trofica (Malpei e Gardoni, 2008).

La digestione anaerobica coinvolge diversi gruppi microbici interagenti tra loro: i batteri idrolitici, i batteri acidificanti (acetogeni e omoacetogeni), ed in fine, i batteri metanigeni, quelli che producono metano e  $CO_2$ , con prevalenza del gas di interesse energetico, che rappresenta circa i 2/3 del biogas prodotto.

Schematicamente il processo può essere così rappresentato:



In forma stechiometrica:



in cui:

- $C_a H_b O_c N_d$ : composizione della sostanza organica presente all'inizio nel rifiuto;
- $C_w H_x O_y N_z$ : composizione della sostanza organica residua;
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ : coefficienti stechiometrici

Il processo biodegradativo si compone di quattro fasi:

1. Idrolisi: in questa prima fase, per intervento di diversi gruppi batterici, si ha la degradazione di substrati organici complessi particolati o solubili, quali proteine, grassi e carboidrati, con

formazione di composti semplici, quali aminoacidi, acidi grassi e monosaccaridi in forma solubile .

2. Acidogenesi: Contestualmente all'idrolisi del materiale organico complesso, particolato o solubile, avviene il processo fermentativo acidogenico in cui i batteri fermentativi degradano i monomeri ed oligomeri organici, zuccheri, acidi grassi ed aminoacidi, producendo acidi grassi volatili, per lo più a catena corta quali il propionato ed il butirrato.
3. Acetogenesi: a partire dai substrati formati nel corso della fase di idrolisi ed acidificazione (acidi volatili, essenzialmente propionato e butirrato, ma anche alcoli) i batteri acetogeni producono acido acetico, acido formico, CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>. Angelidaki et al. (1998) hanno riportato che due differenti meccanismi devono essere considerati a seconda che la degradazione avvenga a partire da acidi grassi a catena lunga (LCFA, long chain fatty acids) o a catena corta (SCFA, short chain fatty acids, o VFA, volatile fatty acids). In generale, si definiscono acidi grassi a catena lunga quelli con più di 5 atomi di carbonio.
4. Metanogenesi: a partire dall'acido acetico o attraverso la riduzione del biossido, si ha la formazione di metano, utilizzando l'idrogeno come co-substrato. In minor misura si ha la formazione di metano a partire dall'acido formico. (Cecchi et al., 2005)

Il processo di digestione anaerobica consta di diverse reazioni simultanee, catalizzate dai microrganismi, nelle quali i composti passano attraverso differenti stati di ossidazione fino ad essere convertiti in metano ed anidride carbonica (Mata-Alvarez, 2003); nella tabella seguente si riportano le fasi della digestione anaerobica e i principali ceppi batterici coinvolti.

**Tabella 4.4 Sequenza delle fasi della digestione anaerobica e principali ceppi batterici (Malpei e Gardoni, 2008).**

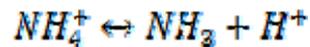
Fase	Batteri	Operazione	Principali ceppi
Idrolisi	Idrolitici	Macromolecole organiche Monomeri solubili	Batteroidi, Clostridium, Ruminococcus, Anaerovibrio, Butyvirbio, Baccillus
Acidogenesi	Fermentativi	Monomeri solubili Acidi organici, alcoli,acido acetico, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Selenomonas, Clostridium, Ruminococcus, Desulfovibrio; Syntrophomonas, Syntrophobacter
Acetogenesi	Acetogeni	Acidi organici, alcoli Acido acetico, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Eubacterium, Acetogenium, Clostridium
Metanogenesi acetoclastica	Acetoclasti	Acido acetico CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	Metanosarcina, Metanothrix, Metanoseta
Metanogenesi idrogenofila	Idrogenofili	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> CH <sub>4</sub>	Metanobacterium, Metanococcus

I parametri limitanti ed inibenti comportano un rallentamento più o meno marcato del metabolismo del consorzio batterico, che potrebbe essere descritto e modellizzato inserendo nelle equazioni cinetiche dei termini rappresentativi dell'inibizione specifica (Malpei e Gardoni, 2008). I più comuni fattori di inibizione sono le elevate concentrazione di ammoniaca e la presenza di elementi tossici.

#### **Ammoniaca**

La metanogenesi risulta inibita dalla presenza di elevate concentrazioni di ammoniaca indissociata, che si comporta come una base debole ed è in grado di superare, come gli acidi deboli in dissociati, la parete cellulare e bloccare l'attività metabolica del microrganismo (Hansen et al., 1998).

La dissociazione dell'ammoniaca in acqua è data da:



Ed è governata dalla seguente equazione di equilibrio tra ione ammonio ed ammoniaca in dissociata, in funzione del pH e temperatura (°C):

$$\frac{[NH_3 - N]}{[NH_4 - N]} = \frac{10^{pH}}{e^{6344/(273+T)}}$$

All'aumentare del pH ed all'aumentare della temperatura la frazione non dissociata tende ad aumentare e quindi questo comporta un maggior rischio di inibizione per processi operati in termofilia e a pH basici.

Le concentrazioni inibenti di ammoniaca libera sono dell'ordine di alcune centinaia di mg/l, non è comunque possibile definire dei limiti molto precisi e stretti anche per effetto della acclimatazione a concentrazioni inizialmente inibenti, seppur lenta, che è stata riscontrata in molte situazioni (Malpei e Gardoni, 2008).

### **Presenza di elementi tossici**

Oltre agli elementi inibenti già citati, vi sono numerose altre sostanze, naturali o xenobiotiche, che esercitano una azione tossica sui batteri anaerobici e metanigeni in particolare. In questo ambito e per molte sostanze non vi sono limiti di concentrazione generalmente riconosciuti come tossici, essendo spesso i fenomeni correlati al pH ed alla temperatura, alla presenza di altre sostanze che possono agire in maniera sinergica o antagonista e per i fenomeni di acclimatazione che possono instaurarsi.

Alcune sostanze, ed in particolare metalli, possono favorire il metabolismo a basse concentrazioni ed anzi sono necessari come micronutrienti, mentre a maggiori concentrazioni diventano inibenti.

Tra le sostanze riportate come tossiche per i metanigeni rientrano solventi, sostanze alogenate, chetoni, esteri, pesticidi, ecc. (Mata Alvarez e Macè, 2004).

Esistono differenti tipologie di antibiotici, molte delle quali possono essere espulse ancora attive dagli organismi; tali sostanze si ritroveranno quindi nei liquami. La problematica nasce dal fatto che esiste la possibilità che queste sostanze abbiano un effetto inibente o tossico sulle popolazioni batteriche di interesse per la digestione anaerobica. Infatti, si possono determinare selezioni delle colture, riduzione del tasso di

crescita oltre ad una diminuzione della biodegradabilità del substrato e della produzione di biogas (Malpei e Gardoni, 2008) e, in particolare, di metano.

La produzione di metano, anche definita in letteratura come Potenziale Biochimico di Metanizzazione (BMP acronimo inglese di Biochemical Methane Potential), è definita come la produzione di metano che si osserverebbe per un tempo di degradazione infinito ed in condizioni ottimali (inoculo acclimatato, assenza di inibizione, condizioni ambientali ottimali). Tale parametro rappresenta il corrispondente anaerobico del BOD (Biochemical Oxygen Demand) e, come il BOD, è valutabile solo per via sperimentale (Malpei e Gardoni, 2008).

Tuttavia, esattamente come nel caso della degradazione aerobica, informazioni di tipo preliminare riguardo il potenziale di biometanazione possono anche essere ottenute a partire dalla caratterizzazione chimica del substrato organico, ad esempio da informazioni quali (Vismara et al., 2008):

- misure aggregate, es. Solidi totali (ST) e Solidi volatili (SV), domanda chimica di ossigeno (COD);
- composizione elementare della sostanza organica, Azoto, Fosforo.
- natura e concentrazione delle molecole organiche contenute nel substrato oggetto di analisi.

Infatti, questi valori sono indicatori dell'energia chimica della sostanza organica, in termini di quantità di elettroni che essa può cedere ad un accettore finale; tanto maggiore è l'energia chimica della sostanza organica, tanto più elevato potrà essere il suo potenziale di biometanazione, sempre che i microrganismi coinvolti siano in grado di sfruttarla. In condizioni reali, a causa della incompletezza delle reazioni di biodegradazione, soprattutto della prima fase idrolitica, non tutto il contenuto di sostanza organica presente nella matrice in digestione viene effettivamente convertito in biogas.

I principali motivi per cui la degradazione anaerobica può non essere completa sono molteplici, tra cui:

- la sintesi di nuova biomassa che, per quanto limitata, sottrae tra il 5 ed il 10 % del substrato introdotto;
- le sostanze organiche presenti in forma particolata richiedono una preventiva idrolisi a monomeri solubili;
- essendo il tempo di digestione limitato, la degradazione non sarà completa;

- le condizioni di prova possono non essere ottimali, rallentando o favorendo l'incompletezza del processo di degradazione.

In condizioni favorevoli di materia organica solubile, si possono ottenere livelli di conversione superiori al 90-95%. Se la materia organica è prevalentemente particolata e se contiene frazioni significative di frazioni ligno-cellulosiche, la percentuale di conversione può scendere anche significativamente (Vismara et al., 2011).

Un metodo di stima può essere legato alla matrice organica e al contenuto di specifiche classi di molecole organiche di diversa biodegradabilità. Una matrice organica composta da sostanze organiche semplici e solubili sarà rapidamente e completamente convertita in biogas, mentre matrici composte da sostanze polimeriche (proteine, carboidrati, acidi grassi a lunga catena e fibre) sarà degradabile solo per la frazione di queste sostanze che potranno essere idrolizzate nel corso del tempo tecnico di digestione.

Per quanto riguarda la valutazione per via sperimentale, i metodi possono distinguersi tra quelli basati sulla scomparsa dei substrati e quelli basati sulla determinazione dei prodotti di degradazione. Questo tipo di classificazione è tuttavia complicata dal fatto che la degradazione anaerobica è il risultato dell'azione di molteplici biotrasformazioni operanti tanto in serie quanto in parallelo; ne risulta che i prodotti di reazione di un sottoprocesso rappresentano i substrati di quello successivo. In quest'ottica, gli unici prodotti ultimi di reazione sono solo, a rigore, metano ed anidride carbonica; i primi, in generale, richiedono determinazioni analitiche più complesse, possono prendere come indicatore i solidi volatili o la domanda chimica di ossigeno.

Le procedure basate sul monitoraggio della produzione di biogas, o di metano, sono certamente più diffuse e possono essere ulteriormente classificate in base al metodo impiegato per la misura del volume prodotto, che può essere effettuata a pressione costante per le misure di tipo volumetrico, o a volume costante per le misure di tipo manometrico o ancora determinando, per via gascromatografica, la concentrazione dei singoli gas nello spazio di testa di reattori chiusi.

Il processo di digestione anaerobica sta assumendo sempre più interesse, e si cerca di standardizzare delle procedure per la determinazione del potenziale di biometanazione di una matrice organica (Vismara et al., 2008). Il gruppo di lavoro dell'International Water Association (I. W. A) ha messo a punto dei protocolli ufficiali sulla misura della biodegradabilità. Nell'anno 2009, il gruppo di lavoro ha pubblicato una

proposta di protocollo per la conduzione dei test in batch (Angelidaki et al., 2009), di cui si riportano i punti fondamentali.

Le metodiche ufficiali europee, a cui gli stati membri sono tenuti ad attenersi, sono riassunte nell'Allegato V della direttiva 67/548/EEC (adottata nel 1967). In particolare, i metodi per la determinazione della biodegradabilità sono contenuti nella sezione C (Metodi ecotossicologici) che riporta, ad esempio, diversi metodi per la determinazione della biodegradabilità, per la maggiore parte svolti in condizioni anaerobiche. Due sono le metodiche che considerano l'ambiente anaerobico (C.23 Aerobic and Anaerobic Transformation in Soil; C.24 Aerobic and Anaerobic Transformation in Aquatic Sediment Systems), che però si focalizzano sul destino delle sostanze nei suoli e nei sedimenti più che sulla produzione di biogas. Tuttavia, esistono diverse norme nazionali ed internazionali sul tema della biodegradabilità anaerobica (Muller et al., 2004).

Tutte le norme concordano sulle seguenti condizioni di misura:

- inoculo: fango digerito lavato e risospeso (1–5 g/l);
- temperatura:  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- reattore: contenitore in vetro con chiusura a setto impermeabile ai gas resistente ad una pressione di 2 bar;
- metodo di misura: misura manometrica del biogas;
- valutazione della biodegradabilità: in termini della frazione di carbonio organico della sostanza organica di prova che viene mineralizzato e quindi trasferito al biogas come metano o anidride carbonica, oppure all'alcalinità della sospensione acquosa.

Oltre ai parametri chimico- fisici è importante la valutazione della distribuzione granulometrica delle matrici più grossolane che andrebbe standardizzata, in quanto essa influisce sulla velocità di degradazione, ma alcuni autori suggeriscono che possa anche influenzare lo stesso valore finale di degradabilità.

La scelta della biomassa che ha il compito di avviare la degradazione della sostanza organica, il cosiddetto inoculo, è di fondamentale importanza per la buona riuscita della prova e per la rappresentatività del risultato. L'inoculo deve essere “fresco” ovvero prelevato da un impianto di digestione anaerobica operativo e deve essere possibilmente utilizzato

nel breve periodo, cioè entro poche alcune settimane dal prelievo (Vismara et al., 2008).

L'inoculo può essere prelevato da un tradizionale digestore mesofilo della linea fanghi di un depuratore come da un digestore termofilo di reflui zootecnici, che potrebbe presentare una maggiore acclimatazione a concentrazioni elevate di ammoniaca (Hansen et al., 2004).

Inoltre, è opportuno procurarsi fanghi provenienti da diversi impianti di digestione anaerobica per disporre di una popolazione abbastanza diversificata ed in grado di degradare la sostanza di prova.

La miscelazione dei recipienti di prova è opportuna in quanto favorisce il contatto tra substrato e biomassa, limita l'accumulo degli intermedi di processo, come gli acidi volatili, e rende omogenee le condizioni ambientali in tutto il volume di prova. Essa può essere ottenuta per via meccanica o magnetica; un'agitazione manuale e sporadica, ad esempio una volta al giorno, è possibile anche se non ottimale.

Altra raccomandazione dell'I.W.A. è sullo start up della prova, essa va avviata in condizioni strettamente anaerobiche per evitare che la presenza di ossigeno causi la degradazione aerobica di parte della sostanza organica di prova, causando la sottostima del metano producibile.

Le ultime prescrizioni sono sulla conduzione della prova e sulla verifica dei risultati, il test va condotto portando in avanti in parallelo i campioni di prova e i bianchi. Il bianco contiene la sola biomassa di inoculo, serve a valutare la produzione di metano di tipo "endogeno", cioè associata alla degradazione della sostanza organica residua ancora presente nel fango di inoculo. Questa produzione viene sottratta a quella misurata nelle bottiglie di prova per evidenziare quella da attribuire alla degradazione della sola sostanza organica aggiunta.

Per garantire la giusta significatività statistica ai risultati, per ogni bottiglia (bianco, prova, controllo) vanno previste delle repliche. Prove in triplo sono consigliabili, anche se il numero di repliche va calibrato in base al grado di omogeneità della sostanza di prova e al grado di riproducibilità della propria metodica.

Per quanto riguarda la verifica dei risultati del processo, è sempre opportuno verificare uno o entrambi i seguenti bilanci di massa (Vismara et al., 2008):

- bilancio del COD;
- bilancio del carbonio.

In particolare, il COD presente nella sospensione ad inizio prova deve essere pari al COD misurato a fine prova più il COD corrispondente al metano prodotto, ma il presente bilancio può non essere affidabile se si producono significative quantità di idrogeno molecolare.

Il carbonio presente nella sospensione ad inizio prova (somma del carbonio organico ed inorganico) deve essere pari alla somma del carbonio totale presente a fine prova più quello trasferito al biogas, valutabile a partire dal numero di moli di metano e anidride carbonica considerando che, per entrambi i gas, 1 mole di gas contiene 12 g di carbonio.

### 4.3 LA BIOSTABILIZZAZIONE AEROBICA

Il trattamento biologico di biostabilizzazione, noto come trattamento meccanico- biologico (MBE), a carico di matrici organiche di qualità inferiore, quali quelle provenienti da separazione meccanica del rifiuto indifferenziato, è tra i più diffusi in Europa (APAT, 2003), ed ha come obiettivo:

- la stabilizzazione pre-discarda, intesa come “trattamento” ;
- produzione di materiali stabilizzati (“frazioni organiche stabilizzate” FOS), per applicazioni controllate in attività paesistico-ambientali;
- bioessiccazione, ossia asportazione veloce (circa 21giorni) di gran parte dell’umidità sfruttando il calore generato dalle reazioni biologiche, in modo da aumentare il potere calorifico della massa in previsione di utilizzi energetici; successivi trattamenti meccanici sulla massa essiccata, vengono utilizzati per eliminare la frazione a basso potere calorifico (metalli) e la frazione fine (dimensioni <2mm), consentendo la produzione di combustibile ad alto contenuto calorico (Adani et al. 2002).

Le principali differenze tra un processo di biostabilizzazione e un processo di compostaggio constano nella diversa matrice in ingresso, essendo la frazione organica da selezione meccanica meno pura della frazione umida da raccolta differenziata, e di conseguenza, nelle caratteristiche dei prodotti finali.

In letteratura sono presenti ricerche minori all’applicazione dei processi di biostabilizzazione alla FORSU da selezione meccanica. A tal

proposito, Mato et al. (2006) hanno studiato l'applicazione del compostaggio alla frazione organica selezionata con metodi meccanici. Scopo del lavoro è stato il confronto tra la composizione dei rifiuti, l'analisi del processo di compostaggio e la qualità del compost ottenuto a partire dalla frazione organica da raccolta differenziata e quello ottenuto dalla frazione organica derivante dalla setacciatura del materiale indifferenziato. La vagliatura di questo materiale attraverso pori di dimensione 60 mm, permette di ottenere un materiale composto per l'80 % da frazione fermentabile. Benché, nel lavoro condotto da Mato et al. (2006), né il campione A (rifiuti selezionati alla fonte), né il campione B (frazione del rifiuto a prevalente contenuto di inerti vagliata attraverso un vaglio di 60 mm e poi sottoposta a separazione magnetica) raggiungessero la maturazione, si potevano rilevare alcune importanti differenze nei comportamenti da essi esibito:

- il processo condotto sul rifiuto A comportava un maggior dispendio energetico rispetto al rifiuto B ed era in grado di mantenere il materiale in condizioni termofile più a lungo.
- per il campione B si riscontravano difficoltà nell'ottenere una buona digestione e igienizzazione del processo.
- il compost derivante dal rifiuto A si presentava con un Indice di Respirazione Statico superiore, un contenuto di patogeni inferiore ed un Indice di Germinazione maggiore rispetto al compost derivante dal rifiuto B.

Alla luce dei risultati è stato possibile concludere che una buona selezione all'origine della materia organica è un aspetto chiave per ottenere una buona qualità del prodotto finale (Mato et al. 2006).

Altro fattore che può influire sulla qualità della frazione organica stabilizzata in impianti meccanico-biologici è il quantitativo di rifiuti inviati a trattamento. Quando l'impianto riceve in ingresso un quantitativo superiore alla sua capacità, il processo biologico risente del sovraccarico e fornisce un prodotto caratterizzato da una scarsa qualità. Ne sono un esempio gli impianti MBT Campani come evidenziano gli studi condotti da Panza D. et al nel 2005 e quelli condotti da Belgiorno et al. nel 2007. Tale studio dimostrava che il materiale prodotto negli impianti di trattamento meccanico-biologico campani non fosse adeguato ai fini dell'utilizzo in discarica poiché i parametri analizzati differivano dai limiti normativi (Belgiorno et al., 2007). Infatti:

- la percentuale di contenuto organico era inferiore al valore limite, conseguenza di una selezione inefficace;

- l'elevato rapporto C/N dipendeva sia dal basso contenuto di azoto sia all'insufficiente stabilizzazione aerobica del materiale organico;
- il bassissimo valore di sostanza umida dimostrava che il processo biologico aveva una piccola durata;
- le elevate percentuali di materiali plastici erano probabilmente dovute all'inefficacia della selezione e all'elevato contenuto di plastiche nel rifiuto in ingresso;
- le alte concentrazioni di metalli pesanti (Pb, Ni, CrIII) erano imputabili alla selezione scadente dei materiali che li contenevano.

Il processo biologico di biostabilizzazione è influenzato da alcuni principali parametri da tenere sotto controllo nel corso del suo svolgimento, come già visto per i processi di compostaggio, tra cui: umidità, pH, temperatura, nutrienti (Carbonio, Azoto, Fosforo e Potassio), aerazione, porosità, struttura e pezzatura del materiale.

#### **4.4 LA BIOESSICCAZIONE**

All'interno degli impianti di selezione del rifiuto residuale da raccolta differenziata, oltre alla biostabilizzazione aerobica o alla digestione anaerobica può essere condotto un processo di bioessiccazione. Di norma ciò accade nei cosiddetti MBT a flusso unico, perché il materiale che si ottiene, il bioessiccato, è destinato alle stesse forme di valorizzazione energetica della componente secca.

La bioessiccazione viene raggiunta attraverso due stadi principali:

- triturazione meccanica blanda del rifiuto tal quale per aumentarne la superficie di evaporazione e di scambio della massa, ottenendo così un'accelerazione dei processi di bioessiccamento;
- trattamento biologico della matrice precedentemente triturata. Questo stadio avviene a mezzo di aerazione forzata della biomassa, sfruttando il calore sviluppato dalle reazioni biologiche aerobiche.

Il processo viene completato in circa 15 giorni, con perdite di H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> di circa 25-30 % in peso, che portano il contenuto di umidità a valori percentuali inferiori al 20 %. L'elevato flusso d'aria e la

deumidificazione dell'aria di processo ricircolata consentono un'efficace essiccazione (Velis et al., 2009).

Il basso contenuto di umidità del bioessiccato riduce anche i potenziali impatti del rifiuto, come il potenziale auto-incendio e la produzione di odori. (Tambone et al., 2011)

Il prodotto finale, bioessiccato, viene stoccato temporaneamente in discarica od utilizzato direttamente come combustibile (CDR) in impianti di termoutilizzazione dove si sfrutta il calore prodotto dalla combustione per il riscaldamento delle abitazioni o lo si converte in altre forme di energia.

I principali parametri di processo (Finstein e Hogan, 1993) che consentono la variazione del grado di essiccamento, la biostabilità e l'igienizzazione durante il processo biologico, sono:

- la temperatura,
- l'ossigeno,
- la portata d'aria,
- il contenuto di umidità.

In particolare, la portata d'aria, che influenza la temperatura della biomassa, influenza l'intero processo di bioessiccazione (Haug, 1986), mentre il grado di degradazione del materiale organico incide sul potere calorifico e sul grado di stabilità del prodotto finale.

Nell'ultimo decennio la tecnologia del processo di bioessiccazione ha avuto uno certo sviluppo, infatti si sono avute esperienze di applicazione a scala reale in impianti MBT. I primi impianti operativi furono gli Eco-Deco in Italia nel 1996 e nel 1997 il processo Herhof ad Asslar, Germania (Veli set al. 2009)

## 5 L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione dell'attività sperimentale svolta presso il laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale dell'Università degli studi di Salerno.

Il lavoro ha avuto l'obiettivo di valutare soluzioni innovative per il recupero dei rifiuti provenienti dal sistema integrato di gestione dei rifiuti solidi urbani, nonché lo studio e l'implementazione delle più appropriate procedure di caratterizzazione per la minimizzazione del rischio associato ai prodotti delle stesse attività di recupero.

L'attività sperimentale ha avuto come oggetto due matrici, con caratteristiche merceologiche e chimico-fisiche differenti, per le quali l'identificazione di ipotesi di recupero non convenzionali è di particolare interesse nel panorama tecnico-scientifico. Tali matrici sono il materiale a base cellulosica selezionato alla fonte e la frazione organica dei rifiuti derivante da selezione meccanica.

In particolare, è stata valutata la possibilità di impiego di rese invendute di giornale per la produzione di lettiere e l'impiego della FORSU da selezione meccanica come materiale di ricoprimento giornaliero di discariche.

### 5.1 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il raggiungimento degli obiettivi della ricerca è stato perseguito attraverso la realizzazione di un programma sperimentale, sostanzialmente articolato in due fasi.

Una prima fase è stata rivolta alla caratterizzazione del materiale cellulosico ed una seconda fase dedicata alla frazione umida tritovagliata, (FUT), derivante dal trattamento meccanico del rifiuto solido urbano residuale da raccolta differenziata.

Il materiale cellulosico è stato sottoposto alla caratterizzazione chimico-fisica e, successivamente, si è provveduto a verificarne la compatibilità ambientale attraverso le procedure che, in Italia, sono stabilite dal Decreto Ministeriale 5/2/98, relativo al recupero di rifiuti non pericolosi

in procedura semplificata. Infine, è stata valutata la trattabilità biologica del materiale esausto, a valle, cioè, dell'utilizzo dello stesso come lettiera. Analogamente a quanto illustrato per il materiale cellulosico, la frazione organica da selezione meccanica è stata caratterizzata in riferimento ai principali parametri chimico-fisici. Inoltre, in relazione alle caratteristiche di potenziale fermentescibilità, ne è stato valutato anche il livello di stabilità biologica.

La matrice è stata, quindi, sottoposta ad un processo di stabilizzazione aerobica, condotto a scala pilota, in accordo alle specifiche di cui alla Delibera di Giunta della Regione Campania 426/2011. Inoltre, è stato verificato il potenziale di produzione di biogas per valutarne il possibile utilizzo nell'ambito di processi anaerobici, finalizzati al recupero contestuale di energia dal biogas e di materia dal digestato.

I capitoli successivi illustrano, nel dettaglio, i materiali e le procedure sperimentali adottate e discutono i risultati conseguiti alla luce della letteratura scientifica.

## 6 MATERIALI E METODI

Il presente capitolo descrive il set up sperimentale e le procedure analitiche adottate nel corso dell'attività sperimentale.

A tal fine, è stato diviso in due sezioni:

- la prima focalizzata sui materiali e metodi utilizzati per la valutazione dell'ipotesi di recupero del materiale celluloso;
- la seconda volta alla descrizione dei materiali, degli strumenti e delle procedure che hanno consentito lo studio della ipotesi di recupero della frazione organica da selezione meccanica.

### 6.1 CARATTERIZZAZIONE E TRATTABILITÀ BIOLOGICA DEL MATERIALE CELLULOSICO

Il materiale celluloso utilizzato nel corso dell'attività sperimentale del lavoro di ricerca è stato fornito dall'azienda "*Di Canto SpA*" che svolge, in provincia di Salerno, attività di distribuzione, smistamento, assemblaggio, confezionamento, imballaggio e spedizione alle edicole, di quotidiani, periodici e quant'altro le Aziende editoriali propongono al mercato.

#### 6.1.1 Ciclo di processo e campionamento

Il processo di distribuzione inizia dopo la stampa, quando i mezzi dell'azienda partono per la consegna di circa 60.000 quotidiani, che vengono distribuiti a tutte le edicole salernitane, con il 50% di resa.

La merce ritirata dalle rivendite, quindi, passa in carico al magazzino di controllo dei resi, deputato alla verifica e contabilizzazione delle pubblicazioni rese dai rivenditori tramite lettura del codice a barre. Al termine dei controlli la merce viene smistata e divisa per singola amministrazione editoriale, ricomposta in pacchi e stoccata. A questo punto le riviste con inserti speciali o gadget ritornano all'editore per poi essere riutilizzate nei prossimi anni, i quotidiani vengono accantonati in

un altro locale e i periodici vengono ammassati e destinati al macero. Il ciclo di processo adottato dalla Di Canto S.p.a viene schematizzato nella figura seguente.

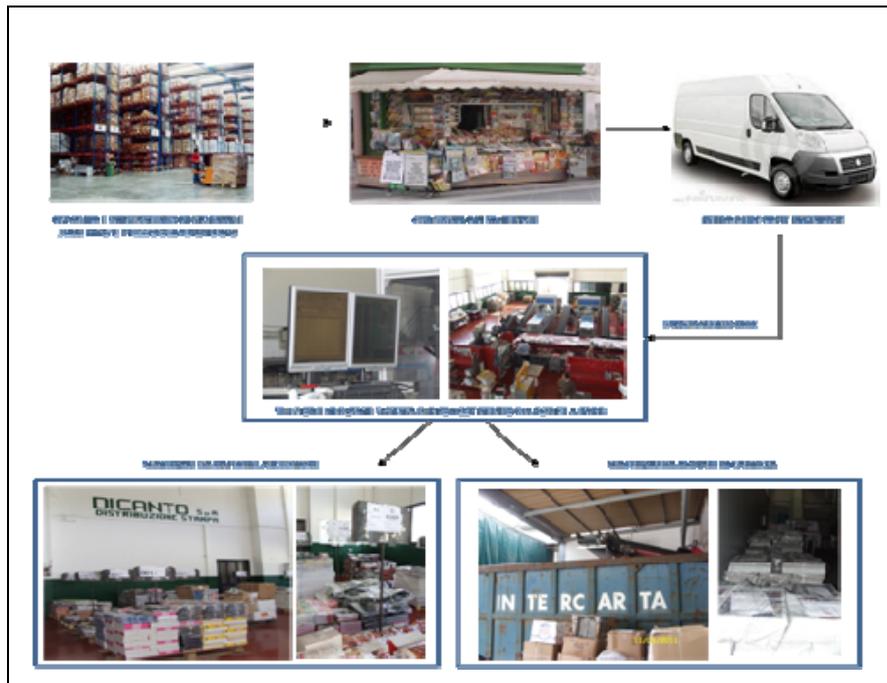


Figura 6.1 Ciclo di processo adottato dalla Di Canto Spa

Per quanto premesso, ai fini del recupero delle rese invendute dei giornali, la ricerca ha inteso perseguire forme innovative per la valorizzazione del materiale, alternative al classico conferimento in cartiera.

A tale scopo, l'azienda ha provveduto a realizzare un sistema elettromeccanico, utile alla lavorazione della carta ed alla produzione di un materiale potenzialmente impiegabile come lettiera nelle stabulazioni.

Il sistema, caratterizzato da una capacità di trattamento pari a circa 35.000 quotidiani al giorno, è stato progettato per consentire la riduzione dimensionale del materiale e la produzione di ritagli aventi caratteristiche geometriche omogenee. In particolare, l'apparecchiatura è costituita da:

- un trituratore monoalbero (Figura 6.2);
- un nastro trasportatore a pettine (Figura 6.3);
- un dispositivo per l'abbattimento delle polveri (Figura 6.4);

- un dispositivo per l'insacchettamento del materiale (Figura 6.5).  
Le rese invendute di quotidiani vengono avviate manualmente al trituratore, mediante il quale gli stessi vengono ridotti fino ad una pezzatura di 1 cm x 5cm. Il materiale, tramite un nastro trasportatore, viene poi caricato all'interno della tramoggia che alimenta il sistema di insacchettamento. La fase di riempimento dei sacchetti è gestita da un apposito sistema di dosaggio che consente di regolare la quantità di materiale da imbustare al fine di predisporre grandi sacchi da circa 5 kg cadauno.

Il particolato prodotto durante le operazioni di caricamento viene allontanato grazie ad un sistema di abbattimento gravimetrico e raccolto all'interno di un apposito comparto



Figura 6.2 Il sistema meccanico messo a punto dalla Di Canto Spa



Figura 6.3 Il trituratore



Figura 6.4- Il nastro trasportatore ed il sistema per la raccolta delle polveri



Figura 6.5 Il sistema di insacchettamento del materiale



Figura 6.6 - Buste contenenti il materiale lavorato

Ai fini dell'attività sperimentale, sono stati considerati:

1. il materiale costituente le rese invendute dei quotidiani;

2. il materiale semi-lavorato, derivante dal processo di sminuzzamento delle rese invendute dei quotidiani;
3. il materiale semi-lavorato esausto, derivante dall'utilizzo del materiale come lettiera all'interno di 3 box per cavalli, di proprietà del sig. Di Canto, al posto della usuale paglia.

Le rese invendute dei quotidiani e il materiale semi-lavorato, sminuzzato e imballato in sacchi di plastica trasparente, sono stati prelevati presso l'azienda Di Canto.

Il materiale esausto è stato prelevato da n.3 box per cavalli, situati nei pressi dell'azienda Di Canto a Battipaglia, dove è stato testato come lettiera non convenzionale.

Sono stati eseguiti n.3 campionamenti, con frequenza bimestrale, prelevando, nell'ambito di ciascuna campagna, n. 3 campioni rappresentativi.

#### **6.1.2 Caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani**

L'analisi della qualità della carta da giornale impiegabile nel processo di produzione delle lettiere ha rappresentato la prima fase dell'attività di caratterizzazione espletata.

Il set di prove condotto ha inteso verificare, in primo luogo, la rispondenza del materiale ai requisiti stabiliti dall'art. 184-ter, comma 1 del D.Lgs 152/06, al fine di poter escludere l'assoggettabilità dello stesso alla disciplina sui rifiuti e poterlo considerare, pertanto, come un sottoprodotto da impiegare direttamente nei processi produttivi. Ai sensi di quanto stabilito dalla normativa stessa, tale analisi è stata effettuata verificando il soddisfacimento dei criteri qualitativi definiti dal DM 5.2.98. Nel caso specifico, si è fatto riferimento ai criteri riportati al Punto 1.1.3 All.1, Sub.All. 1 per l'impiego del materiale cellulosico nell'industria cartaria.

Tuttavia, al fine di provare ulteriormente che l'utilizzo del materiale non comporta impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana, oltre ai parametri individuati dal suddetto decreto, è stato ritenuto opportuno determinare il contenuto di ulteriori inquinanti persistenti (metalli pesanti, composti aromatici, idrocarburi policiclici aromatici, diossine e furani), contraddistinti da una elevata tossicità per l'uomo e per l'ambiente e per i quali, al momento, non esistono limiti di carattere normativo.

In Tabella 6.1, si riporta l'elenco dei parametri analizzati. Il materiale è stato, inoltre, sottoposto anche ad alcuni test specificamente dedicati alla verifica dell'idoneità tecnico-funzionale del materiale lavorato, allo scopo di verificare l'incidenza del trattamento meccanico sulle caratteristiche prestazionali della carta.

La determinazione del contenuto di formaldeide sono state realizzate secondo la norma UNI EN 1541, che prevede la determinazione della formaldeide in estratto acquoso preparato a partire da carta e cartone, l'estratto viene poi analizzato mediante analisi spettrofotometrica all'UV-VIS. L'analisi del contenuto di fenoli è stata eseguita, anch'essa mediante analisi spettrofotometrica all'UV-VIS, seguendo la metodica EPA 9065. Per valutare la concentrazione di inquinanti quali Idrocarburi policiclici aromatici (IPA), Diossine e Furani i campioni sono stati sottoposti a procedura di estrazione secondo la metodica EPA 3550C, mentre le analisi dell'estratto sono state eseguite, per gli IPA, mediante gascromatografia con rivelatore di massa (GC-MS) secondo la metodica EPA 8270C, nel caso di diossine e furani l'estratto è stato analizzato mediante gascromatografia con detector a cattura di elettroni (GC-ECD) secondo la metodica EPA 8082 A.

**Tabella 6.1 - Le analisi per la caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani**

Finalità	Parametri	Valore limite
Classificazione del materiale	Caratterizzazione ai sensi della norma UNI 643	-
Caratterizzazione ai sensi dell'Allegato 1 - Suball 1 - DM 5.2.98	Merceologica (presenza di impurezze)	<1%
	Presenza di carta carbone, carte bituminate	assente
	Formaldeide	≤0,1%
	Fenoli	≤ 0,1%
	Policloro bifenili + Policloro trifenili	≤ 25 ppm
Verifica del contenuto di sostanze pericolose	Metalli pesanti	-
	Composti aromatici	-
	Idrocarburi policiclici aromatici	-
	Diossine e furani	-

### **6.1.3 Caratterizzazione prestazionale e chimico-fisica del materiale semi-lavorato**

La caratterizzazione del materiale prodotto dal sistema meccanico in precedenza descritto è stata espletata attraverso la determinazione di numerosi parametri di natura chimico-fisica.

In particolare, le analisi chimico fisiche sono state effettuate allo scopo di verificare la rispondenza ai criteri stabiliti DM 5.2.98 (nel caso specifico riportati al Punto 1.1.3 All.1, SubAll.1: ex-MPS per l'industria Cartaria) a seguito del trattamento meccanico di triturazione.

La verifica dell'eventuale alterazione delle caratteristiche qualitative del materiale conseguenti al trattamento è stata effettuata anche in relazione ad inquinanti appartenenti alla classe dei composti cancerogeni e/o tossici, normalmente non considerati dalla normativa ai fini del recupero di rifiuti celluloseici nell'industria cartaria.

Tuttavia, in riferimento al presunto impiego diretto del materiale come lettiera, è stato ritenuto necessario verificare anche la compatibilità ambientale dello stesso.

In assenza di una normativa specifica che definisca le caratteristiche chimico/fisiche del materiale cartaceo ai fini del suo recupero come lettiera, la compatibilità ambientale del materiale lavorato è stata valutata attraverso l'esecuzione di un test di cessione, eseguito ai sensi del D.M. 5/2/98, applicato per verificare la possibilità di impiego in campo ambientale (realizzazione di terrapieni, sottofondi stradali, riprofilatura dei terreni, etc.) dei materiali derivanti dal recupero dei rifiuti non pericolosi. Com'è noto, infatti, i test di cessione vengono adoperati per verificare il potenziale rilascio di inquinanti verso suolo, sottosuolo ed acque sotterranee e superficiali, provocato dalla percolazione di acque meteoriche.

La seconda parte delle attività di caratterizzazione del materiale prodotto ha inteso verificare le caratteristiche prestazionali dello stesso, nell'ottica del suo utilizzo come lettiera. A tal riguardo, sembra opportuno evidenziare che nel panorama legislativo nazionale ed europeo non esiste una normativa volta a disciplinare l'impiego del materiale né, tantomeno, norme tecniche codificate, atte a definire gli standard di prodotto. La verifica delle prestazioni del materiale e della compatibilità dello stesso agli usi previsti risulta, infatti, alquanto discrezionale e viene eseguita in forma volontaria dal produttore per valutare la rispondenza del materiale a precise esigenze del mercato.

Si è ritenuto, pertanto, necessario valutare:

- il pH;
- la capacità assorbente;
- l'impatto odorigeno nel tempo;
- la sterilità del materiale.

Le proprietà assorbenti del materiale sono state valutate attraverso i test usualmente impiegati per determinare la capacità di ritenzione idrica massima (CRIM) dei rifiuti. In particolare, il valore della capacità di assorbimento è stato ottenuto come rapporto tra il CRIM ed il peso iniziale del campione.

In primo luogo è stata calcolata la percentuale di umidità nel campione. La percentuale di umidità è stata determinata dalla formula seguente:

$$U_{t,q} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100$$

dove:

$U_{t,q}$  = percentuale di umidità del campione [%]

$P_i$  = peso iniziale del campione, [g]

$P_f$  = peso finale del campione, [g]

In seguito si è passati alla determinazione della capacità di ritenzione idrica massima del campione che avviene nel modo seguente:

- si è pesato il sacchetto bagnato e strizzato che è andato a costituire la tara;
- si è sistemato il campione nel sacchetto e lo si è chiuso;
- si è posto il sacchetto contenente il campione in un secchio con acqua (Figura 6.6); nel fare questa operazione si è fatta molta attenzione che il sacchetto non fosse a contatto con le pareti e con il fondo. Il campione così sistemato è stato lasciato a bagno per 12 ore;
- trascorse le 12 ore, si è estratto il campione dal contenitore e lo si è lasciato sgocciolare per 6 ore, in modo da portare il campione nella condizione di massima ritenzione idrica;
- si è pesato il sacchetto contenente il campione.

A questo punto, una volta nota l'umidità del campione e la quantità di acqua assorbita del campione è stato possibile determinare la capacità di

ritenzione idrica massima attraverso la seguente relazione:

$$CRIM = (P_i * U_{t,q.}) + Q_a$$

dove:

CRIM= capacità di ritenzione idrica massima, [g];

$P_i$ = peso iniziale del campione posto nel sacchetto, [g];

$U_{t,q.}$ = percentuale di umidità nel campione tal quale, [%];

$Q_a$ = quantità di acqua assorbita

$$Q_a = P_f - P_i$$



Figura 6.6 - Particolare della prova per determinare la capacità assorbente

Per la verifica del potenziale impatto odorigeno, invece, è stato predisposto un apposito sistema sperimentale (Figura 6.7), costituito da una camera flussata in PE, all'interno della quale è stato posizionato un recipiente contenente 600 g del materiale da testare, quest'ultimo preventivamente imbibito di una soluzione acquosa contenente ammoniaca in concentrazione pari allo 0,1% (assunta come composto odorigeno modello).

All'interno della camera, sono stati alloggiati n.3 campionatori passivi, ciascuno costituito da un corpo diffusivo cilindrico in polietilene (PE) poroso nel quale è stata inserita una cartuccia, coassiale al corpo diffusivo stesso, attivata specificatamente per il campionamento dell'ammoniaca.

La prova ha avuto una durata complessiva di 96 ore ed ha previsto il prelievo sequenziale delle tre cartucce, rispettivamente esposte per un tempo pari a 24, 48 e 96 ore. Dopo l'esposizione, lo ione ammonio prodotto dalla reazione dell'ammoniaca in forma gassosa ed il materiale adsorbente presente nella cartuccia è stato estratto con acqua deionizzata. Il liquido di estrazione, infine, è stato analizzato, in accordo con la metodica APAT-CNR IRSA 4030 Man 29 2003, mediante tecniche spettrofotometriche, con uno spettrofotometro UV-VIS Lambda 25 della Perkin Elmer.

La concentrazione di ammoniaca monitorata è stata espressa in termini di fattore di emissione di ammoniaca, calcolato utilizzando la seguente formula:

$$AEF = (GAC / M) \times 100$$

dove  $GAC$  è la concentrazione di ammoniaca in  $\text{mg Nm}^{-3}$  ed  $M$  è la massa, espressa in grammi, della lettiera usata nei test.



Figura 6.7 Sistema sperimentale per la determinazione del rilascio di ammoniaca

L'impatto odorigeno del materiale è stato valutato, altresì, determinando la concentrazione di odore attraverso l'applicazione della tecnica sensoriale dell'olfattometria dinamica. Le analisi sono state condotte in conformità con la metodica EN 13725:2003, utilizzando l'olfattometro dinamico della serie T08 (ECOMA GmbH, Germania), in dotazione al

Laboratorio di Ingegneria Sanitaria dell'Università degli Studi di Salerno, mostrato in Figura 6.8.



Figura 6.9- Olfattometro TO8

Oltre ai parametri esaminati per caratterizzare le prestazioni delle lettiere, è stata presa in considerazione anche la risposta tossicologica del materiale, quest'ultima valutata attraverso l'esecuzione dei test abitualmente impiegati, in ambito tecnico-scientifico, per stimare gli effetti inibenti la crescita e lo sviluppo di organismi indicatori quali piante, alghe e batteri. Nel caso in esame, i saggi sono stati eseguiti su organismi vegetali (*Lepidium Sativum*) e la risposta tossicologica del materiale è stata valutata in termini di indice di germinazione percentuale (IG%), secondo la norma UNI EN 10780. Tale parametro valuta il numero di semi germinati (ed il loro allungamento radicale) in terreni di coltura preparati con l'elutriato estratto della matrice solida da caratterizzare.

In Tabella 6.2, vengono riassunte le analisi eseguite per la caratterizzazione del materiale lavorato meccanicamente.

Allo scopo di procedere ad una valutazione comparativa dei risultati, le prestazioni tecnico-funzionali del materiale oggetto di caratterizzazione

sono state confrontate con quelle di altri materiali assorbenti, nella fattispecie, la paglia (Figura 6.10) e la lettiera Yesterdaynews realizzata in carta pellettizzata e commercializzata dalla Purina (Nestlè-Purina, Svizzera).

**Tabella 6.2 - Le analisi per la caratterizzazione del materiale lavorato**

<b>Finalità</b>	<b>Parametri</b>
Caratterizzazione ai sensi dell'Allegato 1 - Suball 1 - DM 5.2.98	Merceologica (presenza di impurezze)
	presenza di carta carbone, carte bituminate
	Formaldeide
	Fenoli
	Policloro bifenili + Policloro trifenili
Verifica del contenuto di sostanze pericolose	Metalli pesanti
	Composti aromatici
	Idrocarburi policiclici aromatici
	Diossine e furani
Verifica della compatibilità ambientale	Test di cessione
Verifica delle caratteristiche prestazionali	pH
	Capacità assorbente
	Rilascio di odori
	Livello di neutralizzazione degli odori (prova olfattometrica)
	Salmonella
	Conta microbica
	Test di tossicità <i>Lepidium Sativum</i>



Figura 6.10 La paglia adoperata per i test comparativi

#### 6.1.4 Caratterizzazione chimico- fisica del materiale esausto

Successivamente alla verifica delle prestazioni tecnico-ambientali del materiale semi-lavorato, si è proceduto alla caratterizzazione del materiale esausto, al fine di individuare la forma di gestione più idonea per tale rifiuto.

Occorre evidenziare che, in generale, le lettiere esauste sono tecnicamente equiparabili ai letami di qualsiasi attività zootecnica che conduce allevamento su lettiera (bovini da latte o carne, equini, ovini ecc.). Sotto il profilo normativo, invece, il materiale potrebbe essere configurato in modo diverso: come un effluente da allevamento (prodotto) o come un fertilizzante (rifiuto). Qualora il materiale venisse reimpiegato nell'azienda agricola (e quindi come effluente da allevamento, così come avviene normalmente per il letame) non è soggetto alla normativa ambientale in tema di rifiuti (cfr. articolo 185, comma 1, lettera f), Dlgs 152/2006) per cui deve attenersi alle norme che regolano lo spandimento di letami, liquami e altro sul suolo. Queste norme prevedono la predisposizione dei Pua, Piani di utilizzazione agronomica che determinano i carichi di effluente sul suolo.

Nel caso in cui il materiale venisse etichettato e imballato ai fini della commercializzazione, come un fertilizzante; la norma di riferimento è il Dlgs 75/2010, la quale definisce i parametri di qualità del prodotto.

A tal proposito si evidenzia che, ai sensi del D.M 5.2.98, le deiezioni animali, da sole o in miscela con materiale di lettiera o frazioni della

stessa, rientrano tra le matrici impiegabili per la produzione di compost di qualità o nell'ambito di processi di digestione anaerobica.

Attesa la natura biodegradabile del prodotto oggetto di studio, costituito essenzialmente da materiale cellulosico, il recupero in impianti di trattamento della FORSU appare indubbiamente interessante sotto il profilo economico ed ambientale.

Per valutare le possibili opzioni di gestione del materiale esausto, la carta lavorata meccanicamente è stata utilizzata come lettiera all'interno di n.3 stalle per cavalli (Figura 6.11), in luogo della convenzionale paglia. A tal fine, il materiale è stato sistemato sul pavimento di calcestruzzo di ciascun box, fino a formare uno strato omogeneo di altezza pari a circa 4 cm, permanendovi per un giorno prima di essere rimosso.



**Figura 6.11** Impiego del materiale cartaceo come lettiera

La caratterizzazione è stata mirata alla:

- determinazione dei principali parametri assunti a riferimento per definire la trattabilità delle matrici organiche da avviare a

trattamento biologico (digestione anaerobica e/o compostaggio) e riportati in Tabella 6.3 e Tabella 6.4;

- verifica della possibilità di impiego diretto del materiale come ammendante ai sensi del D. Lgs 75/2010 "Riordino della disciplina in materia di fertilizzanti" (Tabella 6.5);
- verifica della qualità del compost ottenuto dal trattamento biologico aerobico del materiale esausto (Tabella 6.6).

**Tabella 6.3. - Parametri chimico-fisici substrato organico (APAT, 2005)**

<b>Parametro</b>	<b>Unità di misura</b>
Temperatura	°C
pH	-
TS	% o g/kg
TVS	% TS o g/kg
TCOD	mgO <sub>2</sub> /L
SCOD	mgO <sub>2</sub> /L
TKN	g/kg
P <sub>tot</sub>	g/kg

**Tabella 6.4 - Composizione elementare del substrato**

<b>Parametro</b>	<b>Unità di misura</b>
Carbonio	%
Idrogeno	%
Ossigeno	%
Azoto	%
Zolfo	%
C/N	-

**Tabella 6.5 Limiti di qualità per la commercializzazione di ammendante a base di deiezioni animali (D.Lgs 75/2010)**

Parametro	Unità di misura	Valore limite
Umidità	%	≤30
C org	%ss	≥30
C/N	-	≤50
Pb	mg/kg ss	≤140
Cd	mg/kg ss	≤1,5
Ni	mg/kg ss	≤100
Zn	mg/kg ss	≤500
Cu	mg/kg ss	≤230
Hg	mg/kg ss	≤1,5
Cr VI	mg/kg ss	≤0,5

La composizione elementare del substrato, espressa come percentuale in peso di C, H, N, S, è stata valutata mediante Analizzatore Elementare (EA CHNS, Flash 2000, Thermo Scientific).

I metalli sono stati determinati mediante spettrometria ottica al plasma, utilizzando un ICAP 6000 Series (Thermo Scientific), secondo la metodica APAT IRSA CNR 3020 Manuale 29 2003, dopo aver mineralizzato i campioni in forno a microonde (Mars Xpress, CEM) secondo la metodica EPA 3050B.

**Tabella 6.6 Limiti di qualità per la commercializzazione dell'ammendante compostato misto (D.Lgs 75/2010)**

<b>Parametri</b>	<b>UM</b>	<b>Valori limite (Ammendante compostato misto)</b>
pH	-	6 - 8,5
Umidità	%ss	≤ 50
C org	%ss	≥ 20
C umico e fulvico	%ss	≥ 7
C/N	-	≤ 25
N org	%ss	≥ 80 N tot
Pb	mg/kg ss	≤140
Cd	mg/kg ss	≤1,5
Ni	mg/kg ss	≤100
Zn	mg/kg ss	≤500
Cu	mg/kg ss	≤230
Hg	mg/kg ss	≤1,5
Cr VI	mg/kg ss	≤0,5
Tallio*	mg/kg ss	≤ 2
Plastica + vetro+ metalli (≥2 mm)	%ss	≤ 0,5
Inerti litoidi (≥ 5 mm)	%ss	≤ 5
Salmonella	in 25 g	assenti
Escherichia coli	In 1 g	1000-5000 CFU/g
Indice di Germinazione (diluizione 30%)	%	≥ 60
Salinità		da dichiarare
<i>* parametro previsto solo per ammendanti contenenti alghe</i>		

### 6.1.5 Set-up sperimentale per la verifica della trattabilità biologica del materiale esausto

La valutazione della trattabilità biologica del materiale è stata compiuta mediante l'esecuzione di prove di biodegradazione aerobica, realizzate con l'ausilio di un apposito impianto pilota; la prova ha avuto una durata di trenta giorni. Quest'ultimo consiste in n. 3 reattori cilindrici, caratterizzati da una capacità pari ad 8 L e posti su una piastra forata, volta a garantire la diffusione dell'aria all'interno dei singoli reattori. In particolare, l'aria è stata insufflata, ad una portata di 10 L/min per 15 minuti al giorno, mediante un apposito compressore e distribuita attraverso un sistema di diffusori, posizionato al di sotto della piastra forata (Figura 6.12e Figura 6.13).

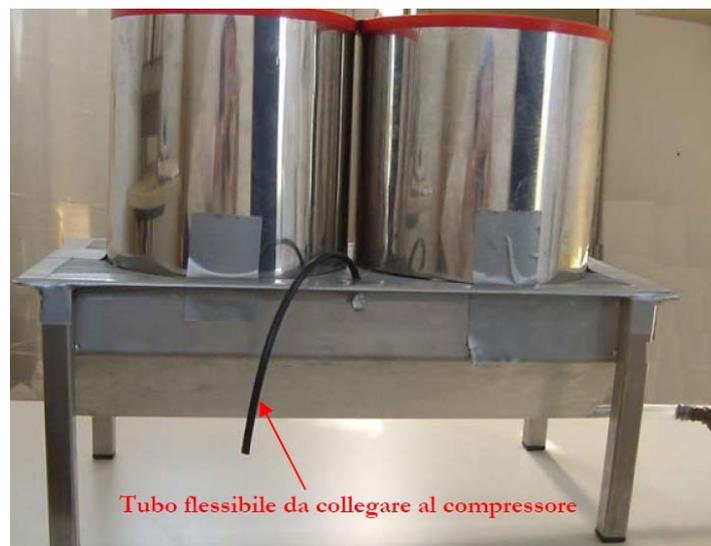


Figura 6.12 Impianto pilota utilizzato per le prove di trattabilità biologica del materiale esausto

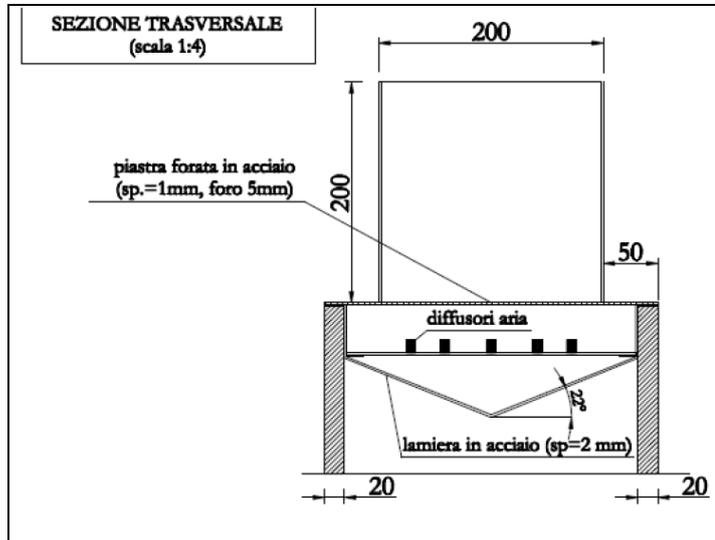


Figura 6.13 Sezione del singolo reattore

Una quantità pari a circa 1 kg di materiale esausto è stata posta all'interno di ciascun reattore e giornalmente rivoltata per sfavorire la compattazione.

Ogni giorno è stata effettuata una misura del pH e della temperatura tramite una sonda (HI 99121 della Hanna Instrument). Le prove per calcolare la percentuale di umidità sono state eseguite ogni 4 giorni.

Al termine del trattamento aerobico il materiale è stato analizzato ai sensi del D. Lgs. 75/2010, in riferimento ai parametri della Tabella 6.6.

## 6.2 CARATTERIZZAZIONE E TRATTABILITÀ BIOLOGICA DELLA FRAZIONE ORGANICA DA SELEZIONE MECCANICA

Nella seconda fase dell'attività sperimentale, il materiale organico oggetto di studio è stata la frazione umida tritovagliata prodotta presso l'impianto STIR di Battipaglia, in provincia di Salerno.

### 6.2.1 Processo produttivo dell'impianto e campionamento

Questo impianto è stato progettato per il trattamento di 378.000 t/a di Rifiuti Urbani Indifferenziati (codice CER 200301) corrispondenti a 1.260 t/g.

L'impianto interessa una superficie pari a circa 78.000 m<sup>2</sup> di cui circa 19.000 m<sup>2</sup> di superficie coperta così suddivisibile:

- 360 m<sup>2</sup> palazzina uffici e servizi;
- 5.200 m<sup>2</sup> edificio di accettazione selezione e imballaggio/trito vagliato sfuso;
- 6.300 m<sup>2</sup> edificio MVA (Macchina Voltacumuli Automatica);
- 4.200 m<sup>2</sup> edificio MVS (Macchina Voltacumuli Semiautomatica);
- 2.700 m<sup>2</sup> edificio Raffinazione.

La restante superficie è destinata a viabilità, circa 47.000 m<sup>2</sup> di cui a verde circa 12.000 m<sup>2</sup>.

Il processo di trattamento effettuato presso lo Stabilimento di Trito-Vagliatura e Imballaggio Rifiuti di Battipaglia (S.T.I.R.) è una selezione meccanica di Rifiuti Urbani Non Differenziati (CER 200301), identificata come operazione di recupero D14 (ricondizionamento preliminare prima delle operazioni di cui ai punti da D1 a D12), ai sensi dell'Allegato C, Parte IV, D.Lsg. 152/06.

Il processo produttivo, completamente automatizzato, organizzato in 2 linee di lavorazione, si attua attraverso le seguenti fasi:

1. *Conferimento.* Il rifiuto viene conferito presso lo stabilimento direttamente dalle società addette alla raccolta presso i comuni della Provincia di Salerno. Il rifiuto viene conferito nell'area di RICEZIONE servita da numero 2 carroponi, con benna a polipo, per il caricamento delle rispettive linee di lavorazione;
2. *Dilacerazione e Triturazione.* Il rifiuto per essere processato nelle linee di lavorazione viene sottoposto ad una fase preliminare di triturazione che ha lo scopo di dilacerare i sacchetti e ridurre la pezzatura secondo dimensioni funzionali alle successive operazioni di selezione. Ogni linea è servita da un tritratore dedicato.
3. *Vagliatura Primaria* (fori da 150 mm). La vagliatura dei rifiuti avviene utilizzando vagli a tamburo rotante dimensionati con un

tempo di permanenza sufficiente a garantire la separazione del materiale in due flussi:

- a. Sopravaglio primario: frazione superiore al diametro dei fori del vaglio è composto da materiali leggeri a matrice combustibile quali ad esempio carta, cartoni, plastica in film e tessili. Dopo aver subito il processo di deferrizzazione magnetica va a costituire la Frazione Secca Tritovagliata (FST), CER 191212, e viene convogliato alla sezione di pressatura e filmatura oppure avviato in forma “sciolta” all’impianto di Termodistruzione di Acerra.
  - b. Sottovaglio primario: frazione passante attraverso i fori del vaglio.
4. *Vagliatura Secondaria* (fori da 60 mm). La vagliatura secondaria suddivide, a sua volta, il sottovaglio primario in due flussi distinti:
- a. *Sopravaglio secondario* contiene una rilevante quantità di materiali ad elevato potere calorifico che dopo aver subito il processo di deferrizzazione magnetica viene sottoposto ad una separazione balistica. La stazione balistica consente di selezionare ulteriormente il materiale suddividendolo in numero 3 flussi in ragione del peso specifico e della pezzatura:
    - Flusso 1 - materiale costituito principalmente da carta e plastica, denominato FST leggera che, tramite nastri di trasporto, va a unirsi alla Frazione Secca del sopravaglio primario;
    - Flusso 2 - costituito principalmente da materiali recuperabili, principalmente plastica, carta, alluminio, viene denominato FST Pesante, classificato con il codice CER 191212 e avviato a recupero presso impianti autorizzati;
    - Flusso 3 - Frazione Fine principalmente costituita da materiale putrescibile, che viene inviata insieme con la FUT al processo di stabilizzazione nell’edificio MVS.
  - b. *Sottovaglio secondario* composto principalmente da frazione organica residua altamente putrescibile. Tale frazione va a costituire la Frazione Umida Tritovagliata (FUT) CER 191212 che, dopo il processo di deferrizzazione

magnetica, viene convogliata nell'edificio MVS per il successivo processo di biostabilizzazione.

5. *Biostabilizzazione* della FUT, mediante un trattamento aerobico, di tipo statico, all'interno dell'edificio MVS. Il materiale viene scaricato all'interno dell'edificio, a mezzo nastri trasportatori della linea di lavorazione, e ivi movimentato a mezzo di una pala meccanica gommata. Il rifiuto permane su platea ad areazione forzata per numero 28 giorni al termine dei quali viene rimosso e stoccato all'interno dell'edificio di raffinazione per essere poi avviato a smaltimento in discarica. Il rifiuto, definito Frazione Umida Trattata Aerobicamente (FUTA) viene classificato con il codice CER 190501.
6. *Deferrizzazione*. I deferrizzatori sono localizzati, come descritto sopra, in punti strategici delle linee di lavorazione al fine di eliminare, dal rifiuto, la maggior parte di metalli ferrosi. Il materiale, classificato con il codice CER 191202, viene avviato a recupero presso impianti autorizzati. Le operazioni di deferrizzazione vengono effettuate nell'edificio adibito alla selezione.

Il Trattamento Meccanico Biologico, operato presso lo Stabilimento di Battipaglia, viene annoverato fra quei trattamenti preliminari (GREEN PAPER, On the management of bio-waste in the European Union, Brussels, 3.12.2008) necessari al ricondizionamento del Rifiuto Urbano Indifferenziato (RUI) e della frazioni di rifiuto residuali dalla raccolta differenziata (RUR): si tratta, in particolare, di una parte di rifiuto che altrimenti dovrebbe essere destinata, direttamente e completamente, a smaltimento o presso impianti di discarica o di incenerimento.

La tipologia di trattamento determina, dunque, sostanziali modifiche della natura del rifiuto urbano indifferenziato rispetto alle frazioni prodotte, in termini di composizione, caratteristiche fisiche e chimiche.

I valori medi della composizione merceologica dei rifiuti di input e di output sono illustrati nella Tabella 6.7.

**Tabella 6.7** Tipologie di rifiuti lavorati, codice CER corrispondente e percentuali in peso.

Categorie merceologiche	U.M.	RUI	FST	FUT	FSP
Sottovaglio	%	8,84	2,6	31,89	1,15
Vetro	%	1,96	1,32	2,43	4,0
Altri inerti	%	0,91	1,34	2,40	7,03
Metalli ferrosi	%	3,88	1,96	1,00	7,76
Metalli non ferrosi	%	0,80			
Carta (fms)	%	6,08	28,95	6,10	13,98
Imballaggi in carta e cartone	%	6,97			
Plastica imballaggi vari	%	17,18	30,42	11,86	38,19
Plastica cpl	%	1,56			
Altra plastica	%	7,47			
Organico putrescibile	%	15,26	3,08	42,40	9,19
Verde	%	2,76			
Legno	%	0,47	0,78	0,74	5,75
Tessili	%	8,03	21,18	0,05	0,36
Pelli e cuoio	%	0,50			
Pile e batterie	%	0,06			
Pannolini	%	6,58	4,05		6,89
Pericolosi (di cui contenitori tf)	%	0,00	0,0	0,0	0,0
Altro	%	10,69	8,56	0,81	12,59

In particolare, a partire da Rifiuto Urbano Indifferenziato è possibile distinguere 3 frazioni di rifiuto con profili merceologici definiti:

- frazione a prevalente contenuto di materiale putrescibile (FUT): il sottovaglio e l'organico sono accorpati in un'unica percentuale che costituisce il 74,29 % della FUT (Figura 6.14);
- frazione secca a prevalente contenuto di materiale combustibile (FST) di cui plastica e carta sono le componenti prevalenti (Figura 6.15);
- frazione secca a prevalente contenuto di materiale recuperabile (FSP), la cui composizione è riportata in Figura 6.16.

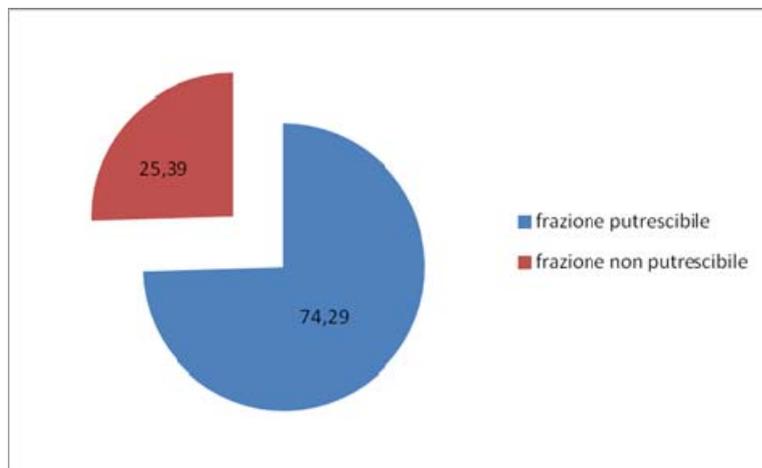


Figura 6.14 Frazione a prevalente contenuto di materiale putrescibile (FUT)

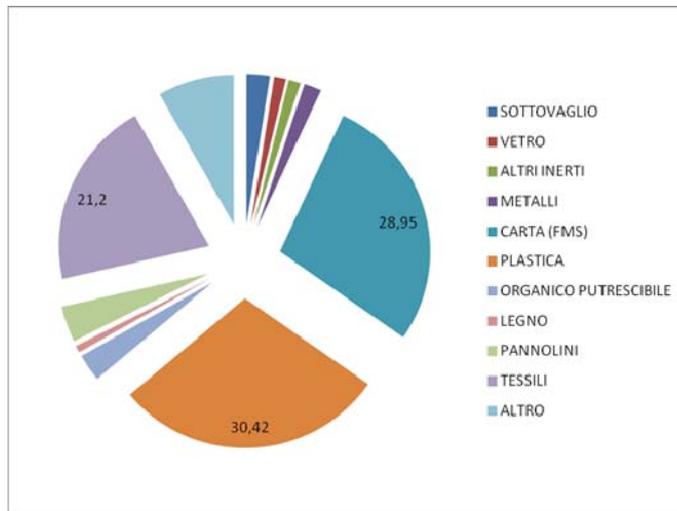


Figura 6.15 Frazione secca a prevalente contenuto di materiale combustibile (FST)

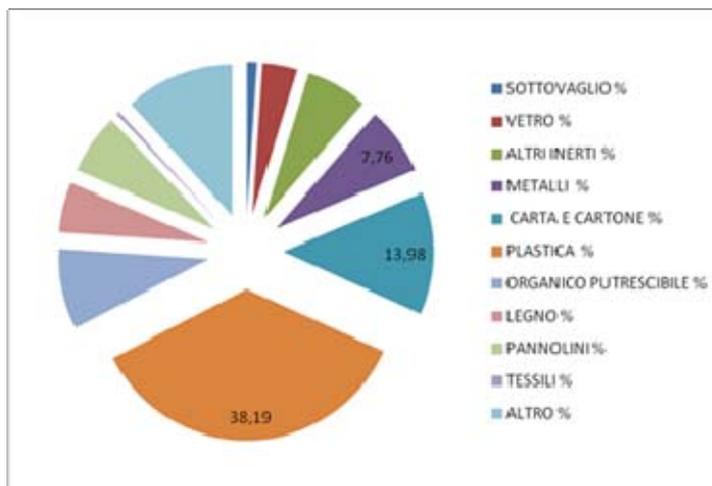


Figura 6.16 Frazione secca a prevalente contenuto di materiale recuperabile

Ai fini della sperimentazione, sono state effettuate tre campagne di campionamento della FUT (Figura 6.17) presso lo STIR di Battipaglia, al fine di prelevare campioni rappresentativi in un arco temporale sufficientemente esteso pari a 8 mesi.



Figura 6.17 La FUT oggetto di studio

### 6.2.2 Caratterizzazione del materiale organico

L'analisi merceologica, svolta presso l'impianto STIR di Battipaglia, è stata eseguita seguendo le indicazioni della metodica ANPA (2000).

La caratterizzazione chimico-fisica della matrice in esame è stata eseguita mediante la valutazione dei seguenti parametri:

- Umidità/ST: la determinazione è stata fatta seguendo le indicazioni della metodica CNR IRSA 2 Q 64 Vol. 2 1984;
- Ceneri/SV: per determinare il valore dei SV è stata utilizzata la metodica CNR IRSA 2 Q 64 Vol 2 1984;
- COD totale e solubile: La determinazione analitica è stata fatta utilizzando le indicazioni riportate nel manuale APAT CNR-IRSA 5130 Manuale 29 2003;
- TKN (Total Kjeldahl Nitrogen): la determinazione è stata fatta seguendo la metodica CNR IRSA Quaderno 64 Vol. 3 1986;
- pH. Il valore è stato determinato utilizzando la metodica APAT CNR IRSA 2060 Manuale 29 2003;
- Analisi elementare (C,H,N,S);
- Metalli.

La composizione elementare, espressa come % in peso di C, H, N, S è stata misurata mediante Analizzatore Elementare (EA CHNS, Flash 2000, Thermo Scientific), mentre la determinazione dei metalli è stata

fatta mediante spettrometria ottica al plasma, utilizzando un ICAP 6000 Series (Thermo Scientific), secondo la metodica APAT IRSA CNR 3020 Manuale 29 2003, dopo aver mineralizzato i campioni in forno a microonde (Mars Xpress, CEM) secondo la metodica EPA 3050B.

In aggiunta alle analisi chimico-fisiche, la matrice è stata caratterizzata anche in relazione alla stabilità biologica.

Tra le metodiche riportate in letteratura (Cossu e Raga, 2008), la misurazione dell'attività respiratoria (test respirometrici) di una matrice organica è senz'altro uno dei parametri più significativi per determinare la stabilità biologica per la produzione di un biostabilizzato da impiegare come copertura giornaliera delle discariche, in accordo agli indirizzi normativi della DGR 426/2011, che definisce le condizioni tecniche per l'utilizzazione del compost fuori specifica, ottenuto dal processo di trito vagliatura del rifiuto urbano indifferenziato e successivamente stabilizzato in condizioni aerobiche, quale materiale di copertura delle discariche.

Ai fini della determinazione di tale parametro è stata seguita la metodica esposta nella Norma UNI/TS 11184:2006 ed è stato utilizzato il respirometro adiabatico (Costech International) di Figura 6.18.



**Figura 6.18 Respirometro adiabatico Costech International**

La stabilità biologica è intesa come la misura del grado di decomposizione della sostanza organica facilmente biodegradabile contenuta in una matrice (Lasaridi e Stentiford, 1996).

Il test di respirazione viene effettuato in un "respirometro aerobico a flusso continuo". (Figura 6.19).

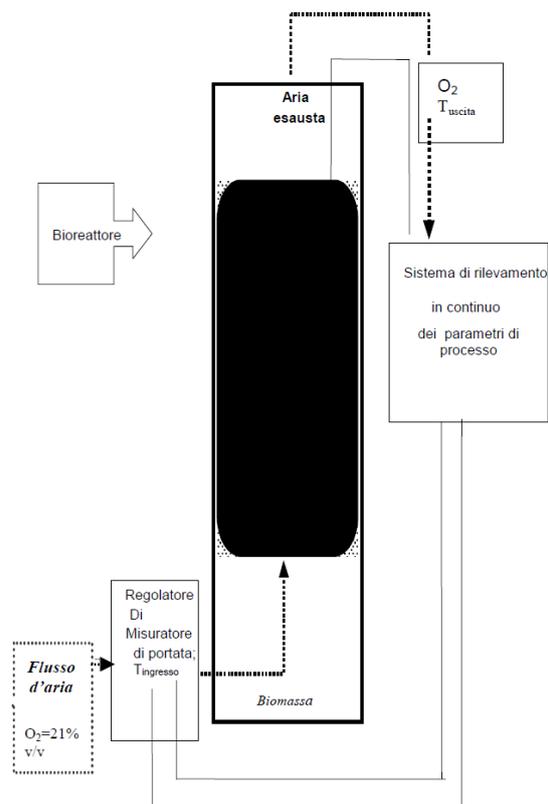


Figura 6.19 Schema del respirometro aerobico a flusso continuo

Il test respirometrico dinamico misura il consumo orario di ossigeno utilizzato per l'ossidazione biochimica dei composti facilmente biodegradabili contenuti in una matrice organica in condizione di insufflazione forzata d'aria nel campione. Il risultato di tale test è l'Indice di Respirazione Dinamico (IRD) espresso in  $\text{mg O}_2 \cdot \text{kg SV}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . A seconda degli obiettivi dell'analisi si definiscono due metodiche per la determinazione dell'IRD:

- metodo A: Indice di Respirazione Dinamico Potenziale (IRDP)

- metodo B: Indice di Respirazione Dinamico Reale (IRDR)

Nel caso in esame, si è determinato l'IRDP, la cui procedura prevede innanzitutto la standardizzazione del campione in termini di umidità, necessaria a garantire le condizioni ottimali per la crescita e l'attività dei microrganismi aerobi allo scopo di misurare l'attività potenziale di degradazione della sostanza organica da parte degli stessi.

La standardizzazione dell'umidità del campione consiste nell'aggiungere un quantitativo d'acqua tale da rendere il contenuto totale d'acqua nel campione pari al 75 % della CIM. Il campione viene umidificato aggiungendo progressivamente la quantità d'acqua calcolata, mescolando opportunamente ed evitando la formazione di aggregati.

Al fine della loro corretta implementazione i test respirometrici sono stati preceduti dalla determinazione di: umidità, pH, solidi volatili (SV), Capacità Idrica Massima (CIM max).

La prova viene condotta tenendo il campione in osservazione nel respirometro per un periodo compreso tra 1 e 4 giorni a seconda della durata della fase di lag (se presente), rilevando il valore dell'indice ad intervalli orari (IRDh). Qualora la curva dell'IRD al termine del quarto giorno, presenti ancora un andamento costante o crescente, viene prolungata l'analisi fino alla registrazione di almeno 24 dati di IRDh.

La misura della quantità di ossigeno consumato per l'attività biologica aerobica, viene desunta dalla differenza di concentrazione di ossigeno tra l'aria in ingresso ed in uscita dal respirometro e calcolata come la media degli indici respirometrici orari (IRDh) relativi alle 24 ore durante le quali la respirazione microbica è più elevata.

### **6.2.3 Set-up sperimentale per la verifica della trattabilità biologica in condizioni aerobiche**

Il processo di stabilizzazione aerobica della FUT è avvenuto in due reattori aperti, operanti in serie, ciascuno della capacità di 0,125 m<sup>3</sup>,areati in discontinuo, per 4 ore giornaliere e periodicamente rivoltati (2 volte a settimana).

Il quantitativo di FUT contenuto in ciascun reattore era circa 15 Kg.

Ogni reattore era costituito da 2 biocelle ciascuna avente forma rettangolare (25×50). La base delle biocelle era costituita da un supporto metallico forato, su cui poggia la matrice, e al di sotto di esso un'ulteriore griglia costituita da un sistema di diffusori e raccordi per garantire l'aerazione. La portata d'aria è stata stimata in 12l/h. Il percolato viene

raccolto in una vaschetta metallica situata al di sotto della griglia con apposito tubo di scarico.  
Nella figure che seguono è possibile visualizzare i reattori e i particolari della biocella.

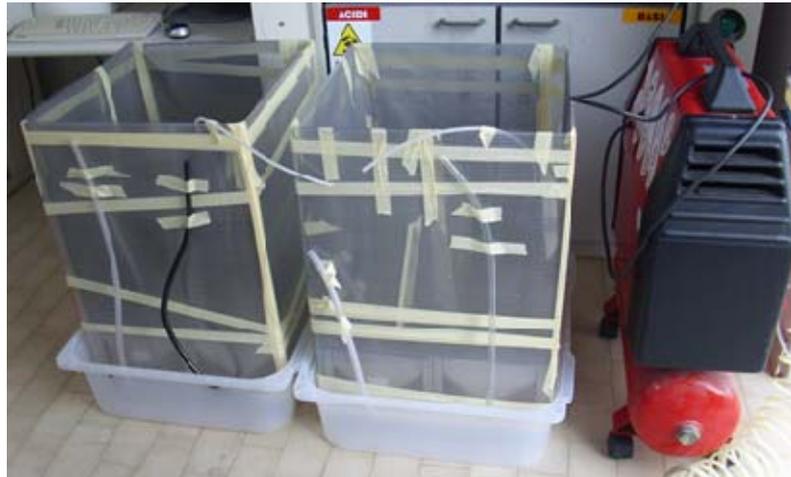


Figura 6.20 - Reattori e compressore per l'alimentazione dell'aria.



Figura 6.21 - Veduta dell'interno del reattore di biostabilizzazione.

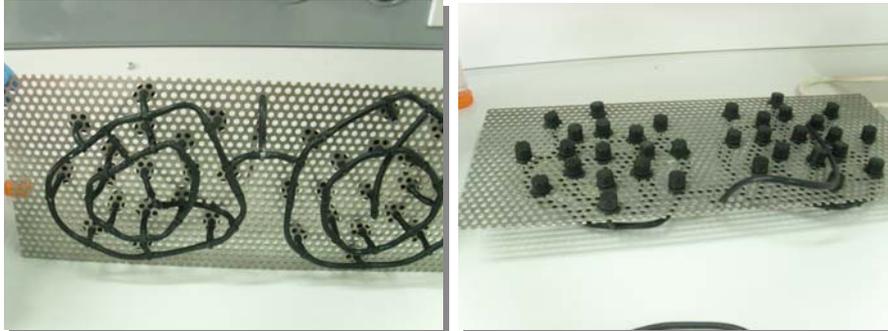


Figura 6.22 - Particolare del sistema di diffusori e raccordi per la diffusione dell'aria.



Figura 6.23 - Particolare tubazione di raccolta del percolato

I test di stabilizzazione aerobica sono durati 21 giorni, nel corso dei quali sono state valutate:

- Umidità, 2 volte/settimana;
- pH e T giornalmente;
- stabilità biologica al 9° e al 21° giorno. Tali analisi sono state effettuate in accordo alle già citate metodiche standard.

Sul campione stabilizzato a 21 giorni, inoltre, è stato eseguito un Test di Cessione per verificare la compatibilità ambientale ai sensi del DM 27/9/2010.

Nella tabella seguente sono riportati i limiti di concentrazione che il campione deve rispettare per l'ammissibilità in discarica.

**Tabella 6.8 Limiti di concentrazione nell'eluato per l'accettabilità in discariche**

<b>Parametro</b>	<b>U.M.</b>	<b>Conc. limite</b>
fluoruri F	mg/l	15
solfati SO <sub>4</sub>	mg/l	5000
cloruri Cl	mg/l	2500
Bario Ba	mg/l	10
Rame Cu	mg/l	5
Zinco Zn	mg/l	3
Nichel Ni	mg/l	1
Arsenico As	mg/l	0,2
Cadmio Cd	mg/l	0,1
Cromo Cr	mg/l	1
Piombo Pb	mg/l	1
molibdeno Mo	mg/l	1
Selenio Se	mg/l	0,05
Antimonio Sb	mg/l	0,07
Mercurio Hg	mg/l	0,02
DOC	mg/l	100
TDS	mg/l	10000

Per la determinazione di tali parametri sul campione è stata applicato quanto prescritto all'Appendice A alla norma UNI 10802:2004, secondo la metodica prevista dalla norma UNI EN 12457-2.

L'eluizione dei componenti è stata effettuata tramite immersione del campione in acqua deionizzata, la quale è stata rinnovata ad intervalli di tempo prestabiliti, per un totale di durata della prova di 16 giorni. Sull'eluato a 16 giorni sono state seguite le determinazioni analitiche previste dal decreto utilizzando le metodiche specificate nel manuale APAT CNR-IRSA Manuale 29 2003.

#### **6.2.4 Set-up sperimentale per la verifica della degradazione in condizioni anaerobiche**

Al fine di valutare sperimentalmente la dipendenza della produzione di biogas in funzione del contenuto di frazione putrescibile, sono state prelevate presso l'impianto STIR di Battipaglia, le diverse frazioni merceologiche costituenti la FUT, in modo da poter comporre in

laboratorio i campioni da utilizzare per le prove di degradabilità anaerobica. Pertanto i test sono stati eseguiti su tre diverse composizioni merceologiche della FUT:

- 1) FUT tal quale;
- 2) solo frazione organica selezionata manualmente dal campione derivante dall'analisi merceologica;
- 3) FUT modificata contenente una percentuale di frazione organica pari al 10%.

I test sono stati effettuati in accordo alla metodica tedesca VDI 4630 "Fermentazione della materia organica" che riporta le linee guida per la valutazione della fermentescibilità di materiali organici e le attrezzature ed apparecchiature necessarie per i relativi test di set-up. In più, tali linee guida.

I test di fermentazione consentono di:

- valutare la possibile produzione di biogas e la biodegradabilità anaerobica di un materiale o di una miscela;
- stimare qualitativamente la velocità di degradazione anaerobica;
- individuare effetti inibitori da parte di alcune sostanze o composti sotto determinate condizioni.

La produzione di biogas è la quantità, misurata sotto condizioni standard di temperatura e pressione (273 °K, 1013 hPa) che viene generata per ogni kg di substrato fresco. Essa dipende dal contenuto di composti organici degradabili biologicamente in condizioni anaerobiche.

La procedura prevede che il substrato venga inserito all'interno dei reattori, insieme all'inoculo. Se necessario, è prevista l'aggiunta di acqua per il raggiungimento del volume di lavoro prestabilito.

Nella determinazione delle quantità di substrato e di fango da inserire all'interno di ciascun reattore, il rapporto VS substrato/VS fango è stato posto pari a 5, in disaccordo a quanto previsto dalla metodica e sulla base di esperienze condotte su matrici analoghe.

Prima di chiudere i reattori, la fase gassosa deve essere fissata con azoto per rimuovere l'ossigeno residuo. La presenza di ossigeno innescherebbe la degradazione aerobica della massa che comporterebbe effetti negativi sulla produzione di biogas.

Durante l'attività sperimentale oggetto di studio, alla FUT, precedentemente sminuzzata (Figura 6.24), è stato aggiunto fango digerito proveniente dall'impianto di depurazione delle acque di Salerno e acqua di diluizione (Figura 6.25).



Figura 6.24 – FUT sminuzzata



Figura 6.25 Preparazione miscela.

Per ogni set di prova, la miscela, in tre ripetizioni, è stata inserita all'interno di reattori in vetro da 2 litri, chiusi ermeticamente dopo fissaggio con azoto. I reattori sono stati poi riposti all'interno di 2 bagni termostatici (Figura 6.26) che garantissero condizioni mesofile (temperatura della miscela = 37 °C); il livello d'acqua nel bagno è stato mantenuto superiore al massimo livello della miscela nel reattore in vetro.

La misura del biogas prodotto è stata effettuata attraverso il Water Displacement Method: ciascun reattore è stato collegato, mediante una

tubazione ad un cilindro capovolto, immerso a sua volta in una vaschetta di plastica riempita d'acqua. Aspirando l'aria imprigionata in ciascun cilindro mediante una pompa peristaltica (Watsow Marlow 323), è stato possibile portare il livello dell'acqua ad un valore noto (Figura 6.27), in modo da misurare giornalmente il suo abbassamento, in seguito alla produzione di biogas.

Analogamente si è proceduto ad eseguire i test sul fango impiegato come inoculo. È possibile osservare nelle figure seguenti l'intero apparato descritto.



**Figura 6.26- Bagno termostato contenente i reattori.**



**Figura 6.27 Innalzamento livello mediante pompa peristaltica.**

Il volume di biogas prodotto è stato letto due volte al giorno per i primi 2 giorni, in seguito la lettura è stata eseguita quotidianamente. Ad ogni lettura il livello dell'acqua contenuta nei cilindri è stato riportato ad una quota nota, misurando così il volume prodotto per differenza. Dai dati di monitoraggio, sono state calcolate le produzioni specifiche di gas (SGP) delle tre miscele e dell'inoculo attraverso la seguente equazione, così come indicato nella metodica seguita:

$$V_0^{tr} = V \cdot (p - p_w) \cdot T_0 / (p_0 \cdot T)$$

Dove:

$V_0^{tr}$  = Volume del gas secco allo stato normale (ml<sub>N</sub>)

V = Volume del gas letto (ml)

p = pressione della fase gassosa al tempo di lettura (hPa)

$p_w$  = pressione di vapore dell'acqua

$p_0$  = 1013 hPa

$T_0$  = 273 °K

T = temperatura del gas di fermentazione o dell'ambiente termostato.

Al fine di valutare la produzione del biogas della sola FUT, alla produzione normalizzata di ogni *batch* è stata sottratta la produzione normalizzata dell'inoculo, ottenuta come media tra i due reattori contenenti il solo fango. Per confrontare tra loro le produzioni dei tre set di prove, si è fatta la media delle produzioni normalizzate dei tre reattori di ciascuna prova.



## **7 RISULTATI E DISCUSSIONE**

In questo capitolo vengono discussi i risultati ottenuti nel corso dell'attività sperimentale.

A tal fine, in accordo alla descrizione di materiali e metodi, il capitolo è articolato in due sezioni principali:

- la prima sezione è dedicata all'ipotesi di impiego del materiale cellulosico come lettiera per animali;
- la seconda sezione è dedicata all'attività relativa alla frazione umida tritovagliata.

### **7.1 CARATTERIZZAZIONE E TRATTABILITÀ BIOLOGICA DEL MATERIALE CELLULOSICO**

Si discutono, di seguito, i risultati relativi alla attività di caratterizzazione del materiale cellulosico oggetto di studio, nonché i quelli relativi alle attività svolte per la valutazione della fattibilità dell'ipotesi di recupero proposta.

#### **7.1.1 La caratterizzazione delle rese invendute di quotidiani**

L'attività di caratterizzazione condotta sulle rese invendute dei quotidiani evidenzia che tale materiale è del tutto assimilabile ad una materia prima secondaria, risultando pienamente rispondente ai requisiti tecnici fissati dall'Allegato 1 Suballegato 1 del DM 5.2.98 per l'impiego della carta come materia prima nell'industria cartaria.

Il rispetto di tali requisiti rappresenta, nell'attuale contesto normativo nazionale, un elemento imprescindibile per l'esclusione dei rifiuti cellulosici dall'ambito di applicazione della normativa sui rifiuti e la conseguente l'assoggettabilità al regime delle materie prime (art. 184-ter del D.Lgs 152/06).

In particolare, ai sensi della Norma UNI EN 643 (2002), il materiale in esame è classificabile come carta da macero di qualità 2 ed identificabile

mediante il codice 2-02-01 “Giornali invenduti, stampa flessologica non consentita”, trattandosi di quotidiani invenduti, privi di inserti o materiale illustrato colorato e aggiuntivi in massa senza presenza di stampa flessografica.

Per quanto attiene la presenza di impurezze, dall’analisi merceologica dei 3 campioni di materiale, si evidenzia la totale assenza sia di materiali estranei, quali metalli, sabbie, materiali sintetici, etc, sia di carta carbone e carte bituminate.

I risultati delle analisi chimiche, inoltre, mostrano l’assenza di composti inquinanti quali fenoli e composti organici clorurati (policloro bifenili e policloro trifenili) e la presenza in traccia di formaldeide, i cui valori di concentrazione risultano, tuttavia, nettamente inferiori ai limiti definiti al punto 1.1.3 dell’Allegato 1 Suballegato1 del DM 5.2.98 per l’impiego delle materie prime secondarie nell’industria cartaria.

I risultati delle prove di laboratorio volte alla verifica della conformità alle specifiche tecniche riportate dal DM 5.2.98 sono sintetizzate in Tabella 7.1.

**Tabella 7.1 - Verifica della rispondenza ai requisiti stabiliti dai punti 1.1.3 ed 1.1.4 dell’Allegato 1 Suballegato1 al DM 5.2.98**

Parametri	Limite	Valore
Classificazione del materiale	-	2-02-01
Merceologica (presenza di impurezze)	<1%	assenti
presenza di carta carbone e carte bituminate	assente	assente
Formaldeide	≤0,1%	0.0320% ±0.0027
Fenoli	≤ 0,1%	n.r
Policloro bifenili + Policloro trifenili	≤ 25 ppm	n.r

I diversi campioni analizzati si caratterizzano, altresì, per l’assenza di solventi organici, questi ultimi impiegati, per lungo periodo, nei processi di stampa per conferire al colore la giusta viscosità e, allo stesso tempo,

facilitare l'essiccazione dello stesso favorendone il fissaggio in tempi brevi

Come evidenziato in Tabella 7.2, nel materiale esaminato si rinviene, invece, l'esistenza di sostanze inquinanti quali metalli pesanti ed idrocarburi policiclici aromatici (IPA), noti per la loro tossicità sull'uomo e sull'ambiente, nonché la presenza in tracce di octadibenzodiossina, limitatamente ad alcuni dei campioni analizzati. Tuttavia, non esistono, attualmente, valori limite normativi che disciplinino il contenuto massimo di tali sostanze nei materiali a base cellulosa, sia che gli stessi vengano prodotti a partire da carta riciclata sia che derivino da materie prima naturali (legno, etc).

La presenza di queste sostanze inquinanti all'interno del ciclo di lavorazione dei materiali cartacei è una problematica nota in letteratura, imputabile all'utilizzo congiunto di alte temperature e additivi chimici durante il processo industriale (Chalbot et al., 2006).

**Tabella 7.2 - Verifica presenza di inquinanti pericolosi**

Parametri	UM	Valore
<i>Metalli pesanti</i>		
Pb	mg/kg	10,48±0,93
Cd	mg/kg	0,21±0,10
Ni	mg/kg	7,06±2,83
Zn	mg/kg	22,61±19,32
Cu	mg/kg	66,47±17,40
Hg	mg/kg	n.r.
Cr VI	mg/kg	n.r.
<i>Idrocarburi policiclici aromatici</i>		
Naftalene	mg/kg	0,105
Fluorene	mg/kg	0,36±0,088
Fenantrene	mg/kg	0,597±0,15
Pirene	mg/kg	0,163±0,041
Benzo(a)antracene	mg/kg	0,146
Crisene	mg/kg	0,16
<i>PCDD/PCDF</i>		
Octacddpc	µg/kg	0,15±0,07

Sebbene la presenza di IPA e PCDD/PCDF nei prodotti cartacei sia stata scientificamente accertata, attualmente, tali composti non sono considerati tra le classi di sostanze assunte a riferimento dal D.M. 21/3/73 e ss.mm.ii. per la verifica delle caratteristiche di qualità degli imballaggi in carta e cartone destinati al contatto con gli alimenti.

### 7.1.2 La caratterizzazione del materiale semi-lavorato

Nella seguente sezione, si discutono i risultati relativi alla caratterizzazione qualitativa della carta prodotta dal sistema meccanico nonché quelli derivanti dall'analisi tecnico- funzionale del materiale lavorato meccanicamente.

Come desumibile dai risultati analitici di seguito riportati, il trattamento di triturazione operato con il dispositivo meccanico messo a punto dalla Di Canto non determina alcuna alterazione della qualità del materiale di partenza, sia per quel che concerne i parametri assunti a riferimento per verificare la rispondenza ai requisiti stabiliti dall'Allegato 1 Suballegato1 del DM 5.2.98 (Tabella 7.4) sia per quel che concerne la presenza di sostanze pericolose (Tabella 7.5).

Il materiale lavorato, infatti, possiede caratteristiche analoghe alle rese in precedenza analizzate, manifestando la totale assenza di solventi aromatici, ed un contenuto di metalli, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) nonché di PCDD del tutto in linea con i valori riscontrati nei quotidiani impiegati nel processo di produzione (Chlabot, 2006).

**Tabella 7.3 - Verifica della rispondenza ai requisiti stabiliti dai punti 1.1.3 ed 1.1.4 dell'Allegato 1 Suballegato1 all. DM 5.2.98**

Parametri	Limite	Valore
Merceologica (presenza di impurezze)	<1%	assenti
presenza di carta carbone, carte bituminate	assente	assente
Formaldeide	≤0,1%	0,0281±0,022
Fenoli	≤ 0,1%	n.r
Policloro bifenili + Policloro trifenili	≤ 25 ppm	n.r

Tabella 7.4 - Verifica presenza di inquinanti pericolosi

Parametri	U.M.	Valore
<i>Metalli pesanti</i>		
Pb	mg/kg	12,47±1,94
Cd	mg/kg	0,063±0,0042
Ni	mg/kg	3,16±1,28
Zn	mg/kg	7,41±0,15
Cu	mg/kg	80,46±4,22
Hg	mg/kg	n.r.
Cr VI	mg/kg	n.r.
<i>Idrocarburi policiclici aromatici</i>		
Naftalene	mg/kg	0,102
Fluorene	mg/kg	0,39±0,008
Fenantrene	mg/kg	0,54±0,033
Pirene	mg/kg	0,15±0,0063
Benzo(a)antracene	mg/kg	n.r.
Crisene	mg/kg	n.r.
<i>PCDD/PCDF</i>		
Octadibenzodiossina	µg/kg	0,1

Ultimo aspetto considerato per caratterizzazione qualitativa della carta lavorata meccanicamente è stata la verifica della compatibilità ambientale del materiale, quest'ultima stimata con l'ausilio di un test di cessione (eseguito ai sensi dell'Allegato 3 del D.M. 5.2.98). In tal modo, è stato possibile valutare il potenziale rilascio di composti inquinanti per effetto della lisciviazione da parte delle acque meteoriche, nonché verificare la rispondenza dei limiti fissati dallo stesso Decreto per l'utilizzo diretto in campo ambientale (per la formazione di rilevati, sottofondi stradali, copertura di discariche, etc.) dei rifiuti recuperati.

In risultati analitici evidenziano che gli eluati prodotti dai campioni esaminati presentano un carico inquinante quasi del tutto rispondente a quello ammissibile per un materiale da impiegare nei ripristini ambientali (Tabella 7.5), fatta eccezione per il COD, il cui valori di concentrazione risulta superiore ai limiti stabiliti dal DM 5.2.98.

Pertanto, sebbene i risultati analitici suggeriscano che il potenziale rilascio di contaminanti sia limitato, è opportuno prevedere che l'impiego del materiale come lettiera avvenga in ambienti controllati ed utilizzando

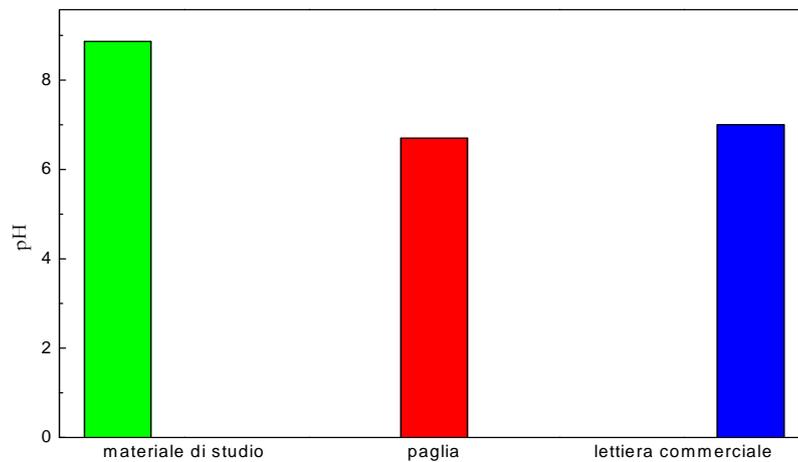
idonei accorgimenti atti ad evitare il contatto diretto con le matrici ambientali (quali aree adeguatamente pavimentate).

**Tabella 7.5 Risultati del test di cessione condotto ai sensi del DM.5.2.98**

Parametro	U.M.	Limite (Allegato 3)	Valore
Nitrati	mg/l	50	n.r.
Fluoruri	mg/l	1,5	0,17±0,02
Solfati	mg/l	250	7,07±0,084
Cloruri	mg/l	100	6,54±0,42
Cianuri	ug/l	50	n.r.
Bario	mg/l	1	0,031±0,0001
Rame	mg/l	0,05	0,011±0,0061
Zinco	mg/l	3	0,12±0,055
Berilio	µg/l	10	1,30±0,0057
Cobalto	µg/l	250	1,50±1,61
Nichel	µg/l	10	5,35±0,52
Vanadio	µg/l	250	14±1,23
Arsenico	µg/l	50	4,50±0,19
Cadmio	µg/l	5	0,32±0,075
Cromo	µg/l	50	11,14±2,09
Piombo	µg/l	50	2,31±0,056
Selenio	µg/l	10	1,05±0,26
Mercurio	ug/l	1	0,23±0,001
Amianto	mg/l	30	0,26
COD	mg/l	30	263±4,58
pH		5,5-12	7,48±0,075

La seconda fase di sperimentazione, mirata alla definizione delle caratteristiche prestazionali del materiale cartaceo per la verifica della sua idoneità all'impiego come lettiera, offre spunto per importanti conclusioni sotto il profilo tecnico-gestionale del materiale.

Dai risultati delle prove sperimentali relative al monitoraggio del valore del pH (Figura 7.1) si evince che il materiale oggetto di studio è caratterizzato da pH basici, diversamente da quanto riscontrato per i campioni di paglia e lettiera *Yesterdaynews*, il cui pH si attesta su valori prossimi alla neutralità. Tale dato non influenza la possibilità di impiego del materiale.



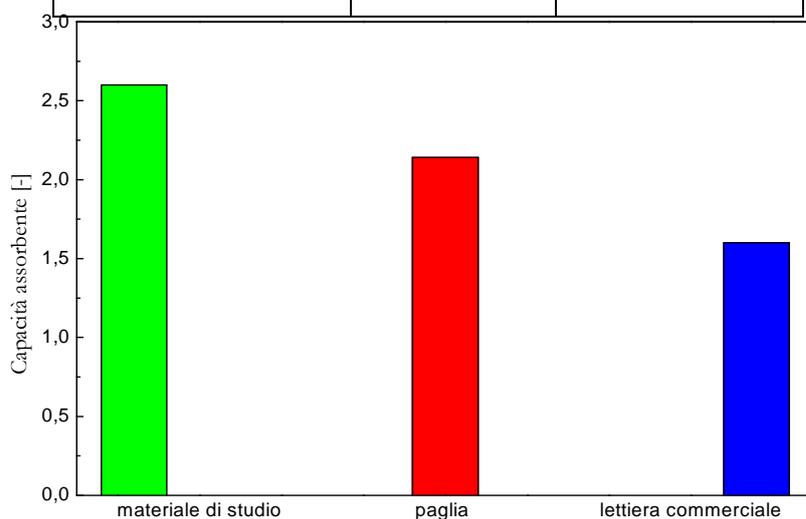
**Figura 7.1** Confronto tra i valori pH dei diversi materiali in esame

I test di ritenzione idrica, invece, mostrano che il materiale cartaceo meccanicamente lavorato presenta una capacità assorbente maggiore rispetto a quella esibita dalla paglia, mentre garantisce prestazioni nettamente superiori rispetto alla lettiera commerciale *Yesterdaynews*, assunta a riferimento nei test (Tabella 7.6 e

**Figura 7.2)**, sebbene la stessa sia composta non solo da carta riciclata ma anche da altri materiali noti per l'elevata capacità assorbente, quali trucioli di legno, come riscontrato dall'analisi visiva del campione al termine delle prove di ritenzione.

**Tabella 7.6 Risultati del test di ritenzione idrica**

Materiale di prova	Umidità Iniziale [%]	Capacità assorbente
Materiale cartaceo lavorato	9,6	2,6:1
Paglia	8,4	2,1:1
Lettiera commerciale	10	1,6:1

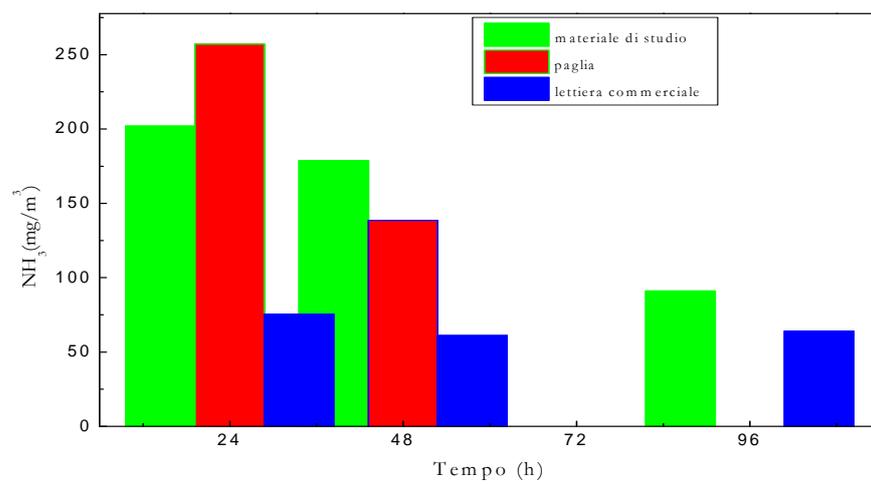


**Figura 7.2 Confronto tra i livelli di massima ritenzione idrica**

In riferimento alla valutazione del potenziale impatto odorigeno del materiale, le prove sperimentali evidenziano, in linea generale, una progressiva riduzione del rilascio di ammoniaca nel tempo.

In particolare, come mostrato dal grafico riportato in

**Figura 7.3**, nelle prime 24 h, il rilascio di ammoniaca nell'aria ambiente da parte della matrice a base di carta lavorata risulta inferiore rispetto a quello esibito dalla paglia, la quale, tuttavia, manifesta prestazioni migliori su periodi di osservazione più lunghi (48 e 96 ore).



**Figura 7.3 Rilascio di ammoniaca: concentrazione di ammoniaca nel tempo**

I risultati migliori, comunque, sono riscontrabili per il campione di lettiera commerciale, che già nell'arco delle prime 24 di prova, si caratterizza per le ridotte concentrazioni di ammoniaca. Tale comportamento è riconducibile alla presenza di particolari additivi nella matrice, volti alla neutralizzazione degli odori, così come deducibile dal brevetto della stessa azienda.

In ogni caso, è possibile affermare che le prestazioni esibite dal materiale cartaceo oggetto del presente studio sono da considerarsi più che soddisfacenti, attesa la usuale pratica di rinnovare la lettiera con frequenza quotidiana e l'assenza di additivi chimici nel materiale.

Rapportando la quantità di ammoniaca rilasciata nell'arco delle 24 h alla quantità di materiale utilizzato per l'allestimento della lettiera sperimentale, è stato possibile, infine, valutare il fattore di emissione associabile alle diverse matrici considerate.

Come si evince dal grafico di

**Figura 7.47.4**, la matrice prodotta dalla lavorazione meccanica dei quotidiani si caratterizza per un'emissione specifica di ammoniaca nettamente inferiore rispetto alla paglia convenzionale e molto più

prossima ai valori caratteristici della lettiera commerciale contenente additivi per la neutralizzazione degli odori.

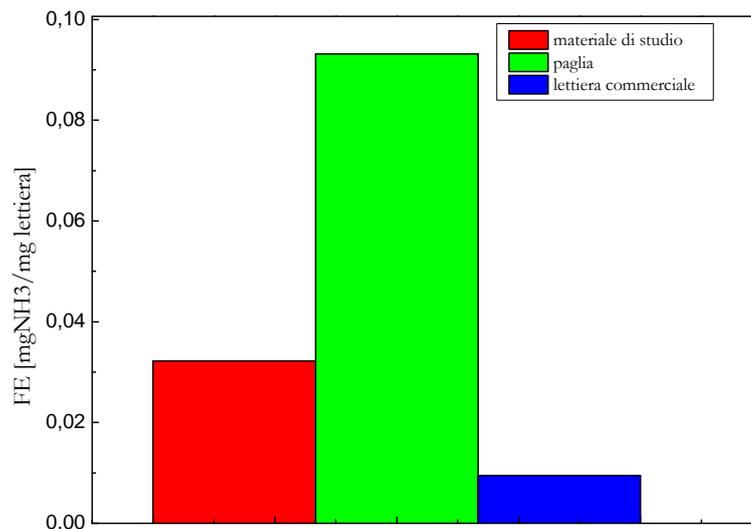
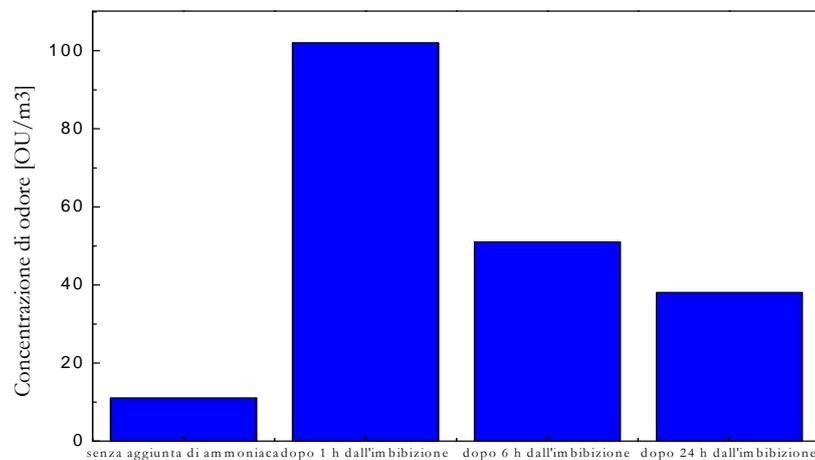


Figura 7.4 Rilascio di ammoniaca: il fattore di emissione valutato sulle 24 h

Il ridotto impatto odorigeno del materiale cartaceo imbibito della soluzione ammoniacale è testimoniato anche dalle prove olfattometriche, i cui risultati (Figura 7.5) evidenziano che la concentrazione di odore subisce una sensibile riduzione nell'arco delle 24 ore, attestandosi su valori inferiori ai 100 OU/m<sup>3</sup>, generalmente associati ad un livello di odore accettabile (De Bertoldi, 1996).



**Figura 7.5 Concentrazione di odore relativa al materiale cartaceo imbibito della soluzione ammoniacale**

La valutazione tecnico-funzionale del materiale ha previsto l'esecuzione di saggi microbiologici e tossicologici.

In particolare, dai risultati delle analisi microbiologiche mostrati in Tabella 7.7, si riscontra la non completa sterilità sia dei campioni di materiale composti di quotidiani lavorati, sia dei campioni di lettiera commerciale. Tuttavia, nel secondo caso, la carica batterica, espressa in termini di Unità Formanti Colonie per grammo di prodotto, si presenta in misura considerevolmente ridotta, indice di una possibile sterilizzazione del materiale prima del suo insacchettamento.

Pertanto, gli studi microbiologici condotti portano a concludere che per il potenziale impiego del materiale oggetto come lettiera non possa essere opportuna una preventiva fase di abbattimento della carica batterica, al fine di evitare rischi durante la sua manipolazione. La contaminazione microbica del materiale utilizzato come lettiera è di particolare interesse nel caso delle stalle, dal momento che i microbi tossici presenti sulla polvere della lettiera possono essere facilmente inalati dagli animali e possono causare l'insorgenza di malattie polmonari. In letteratura sono presenti studi che hanno dimostrato un elevato livello contaminazione di endotossine nell'aria in stalle in cui viene utilizzata la paglia come lettiera rispetto a stalle in cui si utilizza carta di elenchi telefonici (Tanner et al., 1997).

**Tabella 7.7 Risultati analisi microbiologiche**

<b>Materiale</b>	<b>Parametro</b>	<b>UM</b>	<b>Campione n°1</b>	<b>Campione n°2</b>	<b>Campione n°3</b>
Materiale lavorato	<b>Conta batterica</b>	UFC/g	226.360	140.000	35.850
	<b>Salmonella</b>	In 25 g	Presenza	Assenza	Assenza
Yesterday news	<b>Conta batterica</b>	UFC/g	934	464	305
	<b>Salmonella</b>	in 10 g	Assenza	Assenza	Assenza

La presenza di salmonella in uno dei tre campioni analizzati può essere legata ad una non corretta sterilizzazione del contenitore utilizzato in fase di campionamento.

I risultati delle analisi tossicologiche condotte, invece, evidenziano, in linea generale, l'assenza di effetti di inibizione sulla crescita delle specie vegetali utilizzati nell'ambito dei test (*Lepidium Sativum*). In particolare, nel campione n.1, contraddistinto da un indice di germinazione pari al 141%, si assiste ad una vera e propria stimolazione della crescita, tuttavia, un leggero effetto inibitorio viene riscontrato nel campione n. 2, il cui valore dell'indice di geminazione si attesta su valori prossimi al 44% (Tabella 7.8).

I dati tossicologici relativi al materiale meccanicamente lavorato sono stati messi a confronto con quelli ottenuti da test analoghi, condotti sulla lettiera in carta riciclata *Yesterdaynews* commercializzata dalla Purina.

Diversamente da quanto riscontrato per la carta lavorata, tutti i campioni di lettiera commerciale presentano fenomeni di leggera inibizione sulla specie vegetale considerata nei test, come testimoniato dall'indice di germinazione che assume valori sempre inferiori al 70% , legati alla presenza di additivi chimici per migliorare le prestazioni (Tabella 7.8).

**Tabella 7.8 Risultati dei test di fitotossicità su *Lepidium Sativum***

Matriale	Indice germinazione	Campione n° 1	Campione n° 2	Campione n° 3
Materiale lavorato	%	141,45	43,78	90,49
Yesterday news	%	46,15	66,82	69,82
<u>Range IG%</u>	<u>Giudizio</u>		<u>Range IG%</u>	<u>Giudizio</u>
>120	Stimolazione		40 ÷ 80	Leggera Inibizione
80 ÷ 120	Nessun Effetto		<40	Marcata Inibizione

### 7.1.3 La verifica della trattabilità biologica del materiale esausto

I risultati dell'attività di caratterizzazione portano a concludere che il materiale esausto è suscettibile di diverse possibili forme di gestione.

In particolare, dalle analisi chimiche condotte sui diversi campioni prelevati dai box si evidenzia che la lettiera esausta è potenzialmente idonea ad essere utilizzata per l'impiego diretto in agricoltura.

A meno dell'umidità, infatti, tutti i parametri attestanti la qualità del materiale risultano in linea con i valori limite sanciti dall'Allegato 2 del D.Lgs 75/2010 per quanto attiene la produzione di ammendanti a base di deiezioni animali (Tabella 7.9).

**Tabella 7.9 Limiti di qualità per la commercializzazione di ammendante a base di deiezioni animali (D.Lgs 75/2010)**

Parametro	U.M.	Valore limite	Valore
Umidità	%	≤30	39±7,92
C org	%ss	≥30	39,21±3,9
C/N	-	≤50	32,41±11,25
Pb	mg/kg ss	≤140	7,54±3,62
Cd	mg/kg ss	≤1,5	0,091±0,021
Ni	mg/kg ss	≤100	5,3±4,5
Zn	mg/kg ss	≤500	13,59±2,2
Cu	mg/kg ss	≤230	48,80±3,23
Hg	mg/kg ss	≤1,5	n.r.
Cr VI	mg/kg ss	≤0,5	n.r.

Le caratteristiche chimico fisiche della lettiera esausta, inoltre, sono in linea con i valori ottimali tipicamente assunti a riferimento per la preparazione della miscela ottimale da avviare a compostaggio e per la trattabilità biologica del materiale (Tabella 7.10 e

Tabella 7.11).

**Tabella 7.10 Composizione elementare del materiale**

Parametro	U.M.	valore
Carbonio	%	39,76±2,92
Idrogeno	%	5,13±0,42
Azoto	%	1,27±0,22
Zolfo	%	n.r.

**Tabella 7.11 Parametri di riferimento per la trattabilità biologica del materiale**

Parametro	U.M.	valore	Range ottimale (APAT, 2002)
Umidità	%	38,8±4,58	55-65

pH	-	8,5±0,01	5,5-9
C/N	-	30±6,53	20-30
TS	%	61,2±4,57	-
VS	%TS	84,3±0,30	-
sCOD	g/kg	2,94±0,17	-

Attesi i risultati positivi ottenuti dalla caratterizzazione chimico-fisica del materiale, la valutazione della trattabilità biologica del materiale è stata completata mediante l'esecuzione di prove di biodegradazione aerobica, realizzate con l'ausilio di un apposito impianto pilota.

I risultati relativi alla trattabilità biologica mostrano che il materiale in esame è idoneo ad essere impiegato come substrato principale nei convenzionali processi di biotrasformazione adottati per il recupero dei rifiuti organici e la produzione di compost di qualità (Tabella 7.12). In particolare, il valore del rapporto C/N (pari a 30) evidenzia la disponibilità di C ed N in appropriate proporzioni, tali da garantire un andamento ottimale del processo biologico (Huang et al., 2004; Zhu 2007).

**Tabella 7.12 Limiti di qualità per la commercializzazione dell'ammendante compostato misto (D.Lgs 75/2010).**

Parametri	UM	Valori limite	Valore
pH	-	6 - 8,5	8,56±0,17
Umidità	%ss	≤ 50	42,77±2,82
C org	%ss	≥ 20	28,23±1,44
C umico e fulvico	%ss	≥ 7	4,04±0,81
C/N	-	≤ 25	97,93±2,27
N org	%ss	≥ 80 N tot	0,46±0,01
Pb	mg/kg <sub>ss</sub>	≤140	10,195±2,38
Cd	mg/kg <sub>ss</sub>	≤1,5	n.r.
Ni	mg/kg <sub>ss</sub>	≤100	15,70±20,44
Zn	mg/kg <sub>ss</sub>	≤500	31,7±0,85
Cu	mg/kg <sub>ss</sub>	≤230	33,68±22,72
Hg	mg/kg <sub>ss</sub>	≤1,5	0,64
Cr VI	mg/kg <sub>ss</sub>	≤0,5	n.r.
Tallio*	mg/kg <sub>ss</sub>	≤ 2	n.r.
Plastica + vetro+ metalli (≥2 mm)	%ss	≤ 0,5	n.r.
Inerti litoidi (≥ 5 mm)	%ss	≤ 5	n.r.
Salmonella	in 25 g	assenti	n.r.
Escherichia coli	In 1 g	1000-5000 CFU/g	538830

Parametri	UM	Valori limite	Valore
Indice di Germinazione (dil. 30%)	%	$\geq 60$	$75 \pm 8,72$
Salinità		da dichiarare	$20,38 \pm 2,70$

Tuttavia, l'umidità assume valori inferiori rispetto al range considerato ottimale (Suler and Finstein, 1997; Tiquina and Hodgkiss, 1996) e, pertanto, qualora il materiale debba essere sottoposto ad un trattamento di stabilizzazione biologica aerobica, risulterà necessario provvedere all'aggiunta di acqua per riportare il valore entro l'intervallo 55-65%. I bassi valori di acidi umici e fulvici così come l'alta carica batterica suggeriscono, inoltre, che la stabilizzazione della matrice organica è relativamente scarsa (Bernal et al., 1997), evidenziando che la durata di 30 giorni per il processo di biologico non è adeguata alla biotrasformazione del materiale esausto.

## 7.2 CARATTERIZZAZIONE E TRATTABILITÀ BIOLOGICA DEL MATERIALE ORGANICO

Nei paragrafi successivi, sono discussi, anche alla luce della letteratura scientifica di settore, i risultati ottenuti dall'attività sperimentale condotta sulla frazione organica derivante dalla selezione meccanica dei rifiuti solidi urbani.

### 7.2.1 La caratterizzazione della FUT

L'analisi merceologica della FUT mostra l'elevata eterogeneità della matrice, composta per il 67,03% da materiale organico e per il 32,97% da impurità.

In Tabella 7.13 è riportata in dettaglio la composizione della FUT campionata.

**Tabella 7.13** Composizione merceologica della FUT.

Frazione merceologica	Percentuale in peso
Organico	67 %
Carta	8 %
Plastica	19 %
Inerti	5 %
Metalli	1 %

La composizione eterogenea della matrice dipende dalle caratteristiche del rifiuto in ingresso all'impianto e dalle dimensioni dei vagli impiegati per la selezione (Cecchi et al., 2003).

Nella Tabella 7.14 sono sintetizzati i risultati delle analisi chimico-fisiche, che hanno restituito valori non troppo distanti dai quelli medi riportati in letteratura per la frazione organica da selezione meccanica.

In particolare, il materiale risulta poco umido, con un contenuto in secco pari al 62,68%, valore compreso nel range (48-73 %) riportato da Bolzonella et al. (2003) per la FORSU da selezione meccanica.

Analoga considerazione può essere fatta per i solidi volatili, pari al 70,75% ST, per i quali, i medesimi autori riportano una variabilità compresa tra 35 e 91% ST.

**Tabella 7.14 Caratterizzazione chimico-fisica della FUT**

Parametro	Campione
Umidità (%)	37,31±13,21
ST (%)	62,68±11,21
Ceneri (% ST)	41,54±16,67
SV (%ST)	70,75±15,96
COD tot (g/kg <sub>FUT</sub> )	729,08±1,45
COD sol (g/kg <sub>FUT</sub> )	141,89±1,96
TKN (g/kg)	11,2±0,78
pH	6,51±0,07
C (%)	35,47±0,7
N (%)	1,43±0,56
H (%)	4,68±0,09
S (%)	0,082±0,002

Anche il contenuto di metalli è in linea con quello di letteratura, come evidenziato in Tabella 7.15, dove è stato effettuato il confronto con il contenuto di metalli in campioni di FORSU da selezione meccanica e da raccolta differenziata riportati in altri studi.

In accordo con i valori reperiti in letteratura, lo zinco sembra essere il metallo presente in quantità maggiori, seguito dal piombo. Come era facile intuire, la presenza di metalli all'interno della frazione organica separata meccanicamente è molto più marcata rispetto a quanto accade per la frazione organica selezionata alla fonte, dove risultano comunque

presenti. Infatti, come si evince da diversi studi scientifici, il compost derivato da rifiuti selezionati alla fonte o rifiuti verdi generalmente contiene ridotte quantità di metalli pesanti rispetto ai prodotti derivati da matrici selezionate meccanicamente (Epstein et al., 1992; Sharma et al., 1997; Amlinger et al., 2004) .

**Tabella 7.15 Metalli contenuti nella FUT e valori di letteratura**

<b>Metallo</b>	<b>FUT (mg/kg<sub>ST</sub>)</b>	<b>Valore FORSU -SM (mg/kg<sub>ST</sub>)</b>	<b>Valore FORSU - RD (mg/kg<sub>ST</sub>)</b>
<b>Al</b>	16013,3	-	12108,8 <sup>c</sup>
<b>Ba</b>	168,81	-	-
<b>Cr</b>	77,51	40 <sup>a</sup> 113 <sup>b</sup>	72,5 <sup>c</sup> 33 <sup>b</sup>
<b>Cu</b>	190,29	253 <sup>a</sup> 158 <sup>b</sup>	15,1 <sup>c</sup> 89 <sup>b</sup>
<b>Fe</b>	9988,44	-	13987 <sup>c</sup>
<b>K</b>	43227,43	-	3656,8 <sup>c</sup>
<b>Mg</b>	128218,1	-	2301 <sup>c</sup>
<b>Na</b>	12313,91	-	1061,5 <sup>c</sup>
<b>Ni</b>	26,15974	79 <sup>a</sup> 22 <sup>b</sup>	29,6 <sup>c</sup> 26 <sup>b</sup>
<b>Pb</b>	104,59	184 <sup>a</sup> 210 <sup>b</sup>	80,7 <sup>c</sup> 84 <sup>b</sup>
<b>Zn</b>	574,31	558 <sup>a</sup> 382 <sup>b</sup>	660 <sup>c</sup> 219 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Pahl et al., 2007; <sup>b</sup> Sharma et al.,1997; <sup>c</sup> Dong et al., 2010.

Per la caratterizzazione della stabilità biologica della FUT sono stati eseguiti test respirometrici. Sebbene il periodo minimo di osservazione previsto dalla Norma UNI sia di 96 ore, trattandosi di materiale non stabilizzato, si è ritenuto opportuno prolungarne la durata dei test.

L'Indice Respirometrico Dinamico potenziale (IRD<sub>p</sub>) medio è risultato pari a 3075 mg<sub>O<sub>2</sub></sub>/kg<sub>VS</sub> h. Tale risultato è confrontabile con dati riportati in letteratura per matrici simili (Scaglia et al. 2010; Scaglia et al. 2011), e caratteristico di un'attività biologica relativamente ridotta.

Tale risultato può essere ricondotto sia all'elevata presenza di frazioni estranee, sia alle caratteristiche di degradabilità biologica della componente organica della FUT (López et al., 2010), a sua volta legata al verificarsi di fenomeni spontanei di degradazione biologica che si realizzano nell'intervallo di tempo che intercorre tra la produzione del rifiuto e la produzione della FUT.

Questo risultato, tuttavia, impone la necessità di realizzare un idoneo trattamento di stabilizzazione, al fine di raggiungere il valore limite di  $1000 \text{ mgO}_2/\text{kg}_{\text{sv}}\cdot\text{h}$ , indicato dalla DGR 426/2011 per l'utilizzo della FUT come materiale di ricoprimento giornaliero di discariche.

Il materiale è stato, quindi, sottoposto a test di degradazione biologica in condizioni aerobiche ed anaerobiche, così come illustrato nei paragrafi successivi.

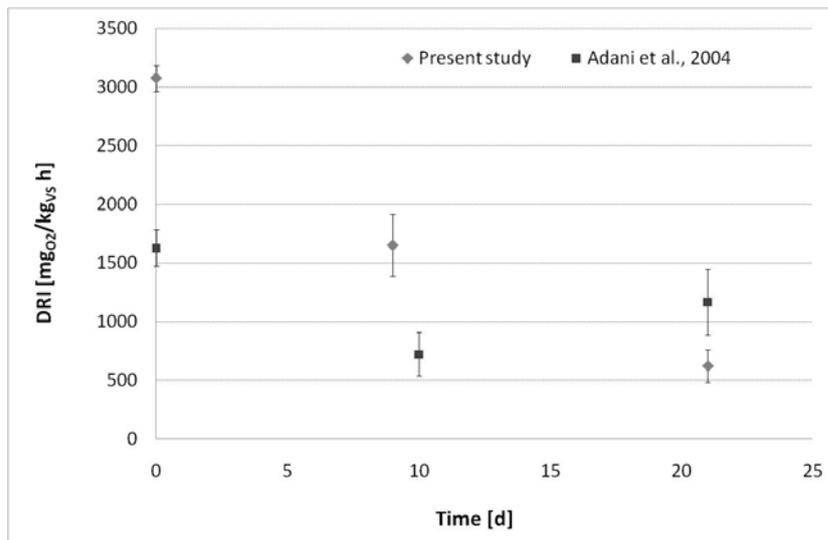
### **7.2.2 La verifica della trattabilità biologica in condizioni aerobiche**

La fase di biostabilizzazione aerobica della FUT è stata implementata, a scala pilota, secondo le specifiche previste dalla Delibera di Giunta della Regione Campania n. 426/2011.

A tal fine, il processo è stato condotto per 21 giorni.

Nel corso delle prove, il monitoraggio del pH e della temperatura hanno evidenziato un corretto sviluppo del processo di stabilizzazione aerobica, che è stato confermato dai risultati dei test respirometrici, condotti su campioni prelevati al 9° ed al 21° giorno di trattamento. È stato, così, possibile identificare la cinetica di biostabilizzazione nel tempo, riportati in

Figura 7.6, dove è evidenziato anche la congruenza con i risultati ottenuti da Adani et al. (2004).



**Figura 7.6** Confronto dei valori medi di IRD ottenuti in questo studio con quelli di letteratura.

I risultati confermano la stabilizzazione ottenuta grazie al trattamento biologico aerobico: durante i primi 9 giorni, la veloce degradazione della materia organica biodisponibile da parte dei microrganismi si riflette in una significativa riduzione del valore medio dell'IRD<sub>p</sub>, che risulta quasi dimezzato se confrontato al valore iniziale. Alla fine del processo di biostabilizzazione aerobica al 21°giorno, il valore medio dell'IRD<sub>p</sub> è pari a 620 mg O<sub>2</sub>/kg<sub>SV</sub>·h, inferiore al limite previsto dalla DGR 426/2011.

Come già accennato, i risultati ottenuti sono coerenti con quelli ottenuti nello studio di Adani et al. (2004). In entrambi i casi, il tasso di riduzione dell'IRD<sub>p</sub> calcolato è maggiore all'inizio del processo di stabilizzazione aerobica e poi si riduce in ragione della riduzione del contenuto di sostanza biodegradabile, che diventa il fattore limitante per la reazione di ossidazione microbica.

Contemporaneamente alla stabilizzazione della massa e coerentemente con i risultati in termini di IRD, è stata registrata una diminuzione di circa il 34% del contenuto di SV: da un valore iniziale medio di 82,04 %ST è stato raggiunto un valore medio di 47,21%ST.

Sulla base dei risultati ottenuti, si può affermare che il processo di stabilizzazione, nelle condizioni operative di sperimentazione, consente il

raggiungimento di un idoneo livello di stabilità biologica, evidenziando che la durata di 21 giorni fissata dalla DGR è sufficiente.

La verifica della compatibilità ambientale del materiale è stata stimata con l'ausilio di un test di cessione, eseguito ai sensi del D.M. 27/9/2010. In tal modo, è stato possibile valutare il potenziale rilascio di composti inquinanti per effetto della lisciviazione da parte delle acque meteoriche, nonché verificare la rispondenza dei limiti fissati dallo stesso Decreto per l'ammissibilità in discarica del materiale.

In risultati analitici evidenziano che gli eluati prodotti dai campioni esaminati presentano un carico inquinante del tutto rispondente a quelli previsti dal decreto (Tabella 7.16).

**Tabella 7.16- Dati test di cessione FUT secondo il DM 27/09/2010**

Parametro	U.M.	Conc. limite	Campione
fluoruri F	mg/l	15	21,15±18,8
solfati SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	5000	12,85±5,87
cloruri Cl	mg/l	2500	30,66±3,59
Bario Ba	mg/l	10	0,36±0,19
Rame Cu	mg/l	5	0,04±0,005
Zinco Zn	mg/l	3	0,46±0,28
Nichel Ni	mg/l	1	0,02±0,0009
Arsenico As	mg/l	0,2	0,01±0,003
Cadmio Cd	mg/l	0,1	<0,002
Cromo Cr	mg/l	1	0,10±0,03
Piombo Pb	mg/l	1	0,06±0,003
Molibdeno Mo	mg/l	1	0,04±0,0087
Selenio Se	mg/l	0,05	<0,005
Antimonio Sb	mg/l	0,07	<0,005
Mercurio Hg	mg/l	0,02	<0,0005
DOC	mg/l	100	378,87±16,7
pH	mg/l		8,09±0,06
TDS	mg/l	10000	1,12±0,04
COD	mg/l		875,06

Le caratteristiche dei percolati da discariche per RSU possono essere estremamente variabili (El-Fadela et al., 2002). Tuttavia, sembra opportuno evidenziare che i valori ottenuti in questo studio sono più bassi rispetto quelli riportati in altri studi simili (Robinson et al., 2005). La ragione può essere legata alla differente composizione del substrato, che è strettamente dipendente dalle caratteristiche del rifiuto indifferenziato e anche dalla complessità del processo di selezione. Tutti i

valori rispettano i limiti previsto dal DM 27/09/2010, ad eccezione del valore di DOC, che è ovviamente più alto del limite, ciò è dovuto alla prevalenza di materiale organico nella matrice esaminata. Comunque, il D.M. stabilisce che tale limite non viene applicato ad alcune categorie di rifiuti inclusi i rifiuti provenienti da trattamenti meccanico-biologici.

### 7.2.3 La verifica della degradazione in condizioni anaerobiche

Al fine di verificare la fattibilità della digestione anaerobica quale processo alternativo di trattamento della FUT, sono state condotte prove di degradazione in condizioni anaerobiche.

Nelle figure seguenti vengono riportati gli andamenti di produzione cumulata di biogas dei campioni testati.

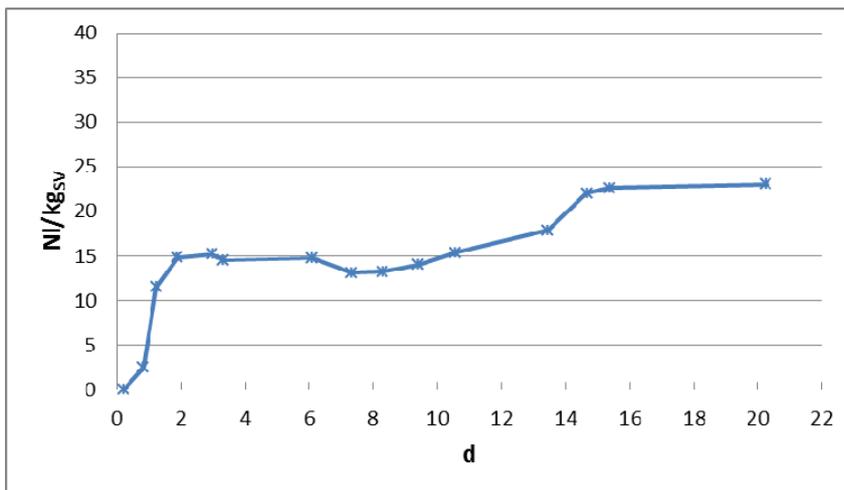


Figura 7.7- Produzione di biogas cumulata FUT

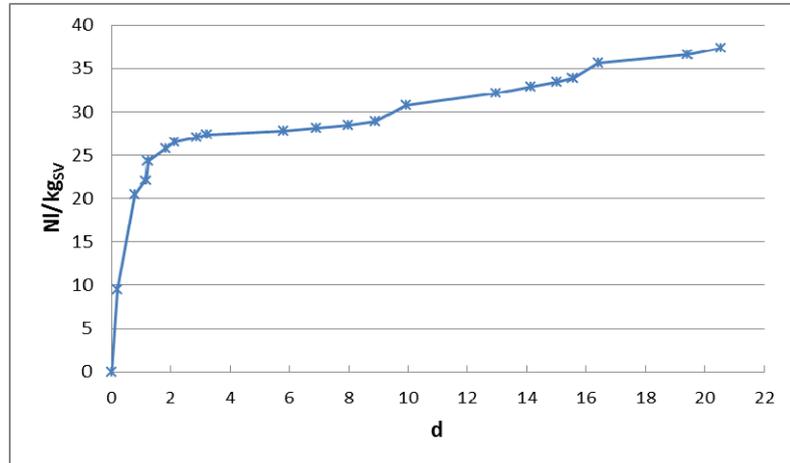


Figura 7.8- Produzione di biogas cumulata frazione organica

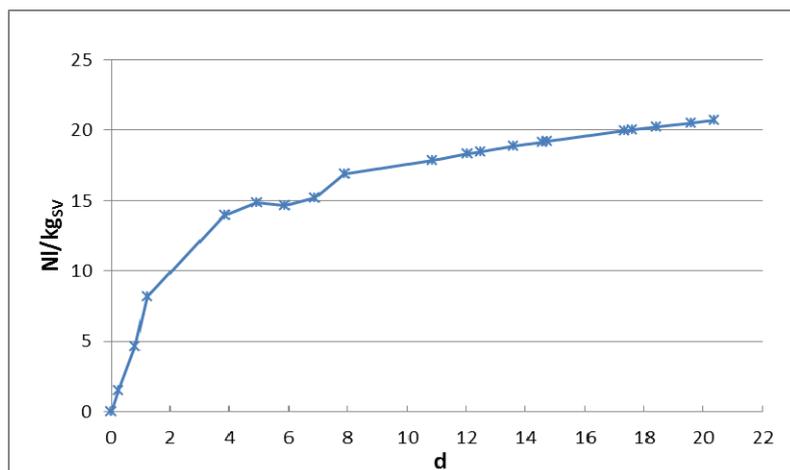


Figura 7.9 Produzione di biogas cumulata con frazione organica 10%.

L'analisi dei grafici mostra che, in tutti i casi, la maggiore produzione di biogas viene ottenuta dopo i primi tre giorni; quindi, si è osservata una significativa diminuzione del livello di produzione di biogas.

Alla fine delle prove, la produzione cumulativa di biogas è stata stimata in un range compreso tra  $22.6 \pm 2.7$  e  $36.6 \pm 3.5$  NI/Kg<sub>sv</sub>, in conformità con il contenuto di sostanza biodegradabile presente nel campione analizzato.

In particolare, la riduzione, all'interno dei campioni sottoposti ai test di degradazione, del contenuto di sostanza organica dal 67% al 10% ha

determinato una riduzione della produzione specifica di biogas dell'8%. È possibile osservare che per contenuto di sostanza organica più basso del 67%, la produzione di biogas è quasi costante, nonostante la presenza di impurità. Un più alto contenuto di sostanza organica ha comportato, ovviamente, un incremento lineare della produzione di biogas.

I risultati delle prove di degradabilità anaerobica possono essere imputati alle caratteristiche della frazione organica del campione esaminato, sia in termini di stabilità biologica che contenuto di impurità.

Sulla base dei risultati riportati, infatti, è ragionevole ritenere che:

- la frazione umida tritovagliata campionata, prima di essere sottoposta ai test, è già mediamente stabile.
- la presenza di frazioni inerti e metalli all'interno della FUT è tale da ridurre la produzione specifica di biogas.

Non si ritiene che tali impurità siano tali da inibire il processo anaerobico, dal momento che lo stesso si è evoluto, in tutti e tre i casi analizzati, in maniera del tutto appropriata.

Del resto, è innegabile che i valori di produzione specifica ottenuti sono molto inferiori rispetto a quelli riportati in letteratura.

Cecchi et al. (2003) hanno evidenziato che il valore tipico di produzione di biogas da rifiuti alimentari è compreso tra 290 e 660 NL/Kg<sub>sv</sub>; più basso è il contenuto di impurità, maggiore è la produzione di biogas.

Simili risultati sono stati riportati anche da Nallathambi Gunaseelan (1997), che ha sottolineato come le rese di produzione di metano siano, di solito, variabili tra 187 and 290 NL/kg<sub>vs</sub>. assumendo un contenuto di metano nel biogas pari al 60%, la corrispondente produzione di biogas dovrebbe variare tra 310 and 485 NL/kg<sub>vs</sub>.

Da un punto di vista tecnico, quindi, l'analisi della degradabilità biologica in condizioni anaerobiche dei campioni analizzati risulta particolarmente interessante. Secondo i risultati ottenuti, infatti, anche promuovendo l'ottimizzazione della linea di selezione del rifiuto oggetto di studio, il residuo organico ottenibile sarebbe caratterizzato da caratteristiche di fermentescibilità tali da non renderlo convenientemente utilizzabile nell'ambito di processi anaerobici e tali da non giustificare i costi di upgrading della linea di selezione meccanica.



## 8 CONCLUSIONI

Numerose sono le ragioni che, negli ultimi anni, hanno portato ad un aumento delle quantità di materiale riciclato nonché ad un miglioramento e affinamento delle tecniche e delle tecnologie utilizzabili: una presa di coscienza della necessità di preservare l'ambiente e di ottimizzare le risorse naturali, normative comunitarie e nazionali sempre più restrittive, sensibilizzazione dell'opinione pubblica sui temi ambientali, possibilità di risparmiare oltre che in termini di materie prime utilizzate anche e soprattutto in termini energetici.

La realizzazione di un sistema integrato di gestione dei rifiuti rappresenta l'approccio più corretto al problema, dal momento che mira a promuovere la valorizzazione dei rifiuti come materiali recuperabili o come fonte di energia.

In questo contesto, però, appare evidente che la caratterizzazione dei materiali sottoposti ad attività di recupero costituisce una fase di estrema importanza, in ragione del potenziale rischio sanitario-ambientale connesso alla reintroduzione, nel ciclo della materia, di sostanze di scarto, talvolta potenzialmente pericolose.

Lo studio esposto nell'ambito di questo lavoro, è stato incentrato sulla valutazione di forme alternative di recupero di materia e di energia dal ciclo dei rifiuti, considerando due tipologie di rifiuto: il materiale celluloso proveniente da raccolta differenziata e la frazione organica da selezione meccanica.

Obiettivi della ricerca sono stati, quindi:

- l'identificazione di metodi innovativi per la valorizzazione dei rifiuti ai fini del recupero di materia;
- lo studio e l'implementazione delle più appropriate procedure di caratterizzazione per la minimizzazione del rischio associato ai prodotti delle stesse attività di recupero.

L'attività sperimentale, per ciascun substrato, è stata articolata in due fasi principali:

- implementazione delle più consone procedure di caratterizzazione ai fini del recupero nonché della

- minimizzazione del rischio sanitario ambientale connesso all'impiego del prodotto recuperato;
- valutazione della fattibilità tecnica del processo di recupero individuato.

Usualmente, le rese di giornali e riviste vengono destinate al recupero in cartiera e, solo in minima, parte avviate a forme di gestione alternative.

Nonostante gli ottimi risultati della raccolta differenziata della carta, l'industria del macero è in crisi a causa del crollo dei prezzi delle materie seconde che coprono abbondantemente il fabbisogno nazionale. Attese le incerte prospettive caratterizzanti il mercato del macero nazionale, il ricorso a nuove possibilità di valorizzazione appare destare crescente interesse in ambito industriale.

La frazione organica che residua dalla raccolta differenziata, opportunamente separata dal rifiuto residuale attraverso sistemi meccanici rappresenta una matrice di difficile gestione, in ragione delle caratteristiche di fermentescibilità associate ad una significativa presenza di frazioni estranee che ne limita il recupero secondo metodiche convenzionali.

L'attività sperimentale ne ha valutato, in una prima fase, la possibilità di impiego come copertura giornaliera di discariche e, poi, nell'ambito di un processo di digestione anaerobica per la produzione di biogas.

I risultati ottenuti sulla matrice cellulosa, prodotta dal sistema di recupero messo a punto dalla Di Canto S.p.A., evidenziano che il materiale oggetto di studio risulta suscettibile di forme alternative di gestione ed è potenzialmente idoneo ad essere utilizzato come lettiera.

Gli esiti delle analisi volte alla verifica delle proprietà chimico-fisiche mostrano, infatti, che il materiale cartaceo semi-lavorato è caratterizzato da un ridotto contenuto di sostanze pericolose, compatibile con i valori limite considerati ammissibili per il trattamento dei prodotti cellulosici nell'industria cartaria. Infatti, il test di cessione, evidenzia che la concentrazione dei diversi inquinanti presenti nell'eluato risulta compatibile con i valori limite stabiliti dal D.M. 5.2.98 per l'utilizzo in campo ambientale (riempimenti, rilevati etc.) dei materiali recuperati dai rifiuti. Inoltre, i risultati dei test tossicologici evidenziano che il materiale cartaceo semi-lavorato non presenta effetti fitotossici.

Per quel che attiene gli aspetti prestazionali, le prove sperimentali evidenziano che il materiale oggetto di studio manifesta livelli di efficienza superiori a quelle esibite dalle matrici convenzionalmente impiegate nelle stabulazioni, quali la paglia. In particolare, i test di

laboratorio mostrano che il materiale cartaceo semi-lavorato sia caratterizzato da una maggiore capacità assorbente e da un ridotto impatto odorigeno rispetto alla paglia, come testimoniato dall'elevata ritenzione idrica del materiale e dal basso fattore di emissione di ammoniaca rilevato durante le prove di laboratorio.

Riguardo le problematiche di gestione della lettiera esausta, gli esiti analitici evidenziano che il materiale risulta potenzialmente idoneo ad essere impiegato direttamente come ammendante o un'ulteriore opzione di gestione potrebbe essere l'utilizzo come substrato principale nei convenzionali processi di biotrasformazione dei rifiuti organici.

In conclusione, i risultati hanno evidenziato la versatilità di impiego del materiale, suscettibile di diverse forme di valorizzazione. A tal fine, gli stessi risultati hanno fornito un contributo tecnico-operativo sostanziale alla predisposizione del brevetto che la Di Canto SpA ha recentemente depositato per l'impiego del materiale semi-lavorato ai fini della produzione di lettiera.

Il lavoro finalizzato alla valutazione del recupero della frazione organica da selezione meccanica, invece, evidenzia come, nonostante la scarsa qualità del materiale sia in termini di stabilità biologica che contenuto di impurità, che un idoneo processo di stabilizzazione aerobica può favorire il rallentamento dell'attività microbica, così da ridurre l'impatto associato alla sua gestione e promuovere l'impiego della matrice come materiale di ricoprimento giornaliero di discariche ai sensi della DGR 426/2011.

I risultati ottenuti dal processo di stabilizzazione aerobica in 21 giorni, infatti, testimoniano una riduzione dell'IRD<sub>p</sub> ad un valore medio inferiore al limite di 1000 mg O<sub>2</sub>/kg<sub>SV</sub> · h.

Sembra opportuno evidenziare che l'efficacia del processo è vincolata alla scala dello stesso, in quanto il controllo del processo e, in particolare, dell'areazione, rappresenta un aspetto fondamentale che, a scala pilota, può essere gestito molto più facilmente che a scala reale. L'attività sperimentale testimonia come il monitoraggio dell'IRD nel corso del processo di stabilizzazione possa costituire un utile indirizzo nella verifica del corretto sviluppo delle cinetiche di degradazione biologica.

Per quanto attiene, invece, la valutazione della degradabilità biologica in condizioni anaerobiche, i dati sperimentali mostrano che la produzione di biogas è compresa tra 23 e 37 NL/Kg<sub>SV</sub>, con il valore maggiore ottenuto dal trattamento della sola componente organica della FUT.

Si tratta, tuttavia, di valori particolarmente esigui che inducono a ritenere poco appetibile l'implementazione di un processo anaerobico per il

trattamento della matrice analizzata, anche nell'ipotesi di ottimizzazione del sistema di selezione della frazione organica.

Sebbene i dati di letteratura siano discordi, è evidente come le proprietà merceologiche e biologiche influenzino in maniera negativa le rese in termini di produzione di biogas.

È evidente, quindi, il ruolo centrale della caratterizzazione ai fini della definizione delle opzioni di recupero di materia dai rifiuti, soprattutto in relazione alla presenza di sostanze tossiche che, attraverso le operazioni di recupero potrebbero essere reintrodotti nel ciclo della materia.

Ulteriori studi andrebbero, pertanto, rivolti alla standardizzazione delle procedure di caratterizzazione, al fine di ridurre il rischio sanitario - ambientale connesso alla gestione dei rifiuti solidi urbani.

## BIBLIOGRAFIA

- Adani F., Baido D., Calcaterra E., Genevini P. (2002). The influence of biomass temperature on biostabilization- biodrying of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 83: 173-179.
- Adani F., Tambone F., Gotti A., (2004). Biostabilization of municipal solid waste. *Waste Management*, 24: 775-783.
- Alvarez E., CallejonMochon M., Jimenez Sanchez J., TerneroRodriguez M., (2002). Heavy metal extractable forms in sludge from waste mater treatment plants. *Chemosphere*, (47),765-775.
- Andersson M., (1996). Performance of bedding material in affecting ammonia emissions from pig manure. *J. Agric. Engegng. Res.*, (64), 213-222.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., Ahring, B.K. (1999). A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. *Biotechnology and Bioengineering* ,( 63), 3, 363-372.
- ANPA (2000). Analisi merceologica dei rifiuti urbani Rassegna di metodologie e definizione di una metodica di riferimento.
- Arafat A., Jijakli K., Ahsan A. (2013). Environmental performances and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. In press on journal of Cleaner Production.
- ARPA Veneto, (2002). La tecnologia del compostaggio. A.A.V.V.
- Avella M., (2008). "Best practisies" nella raccolta e nel riciclo dei rifiuti di imballaggio in vetro. La gestione integrate dei rifiuti. 63° Corso di aggiornamento in Ingegneria sanitaria- Ambientale. Politecnico di Milano. Cap.V.
- Belgiorno V., Panza D., Amodio V., Russo L., (2007). MSW stabilized organic fraction landfilling. Sardinia 2007, International Waste Management and Landfill Symposium, CISA publisher, S.Margherita di Pula, Cagliari.
- Belgiorno V., Panza D., Russo L., Amodio V., Cesaro A. (2011). Alternative stabilisation options of mechanically sorted organic fraction from municipal solid waste prior to landfill disposal. *International Journal of Environmental Engineering*, 3 (3/4), 318-335.
- Bernal M.P., Paredes C., Sánchez-Monedero M.A., Cegarra J., 1997. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technol.* 63,91-99.
- Bernal M.P., Alburquerque J.A., Moral R., (2009). Composting of animal manuresand chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* (100), 5444-5453.

- Boccacci Mariani M., Chiacchierini E., Gesumundo C., (1999). Potential migration of Diisopropylnaphthalenes from recycled paperboard packaging into dry foods. *Food Additives and Contaminants*, (16), 207-213.
- Bohm R. A., Folz D. H., Kinnaman T. C., Podolsky M. J., (2010). The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*, (54), 864-871.
- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Mahimairaja, S., (2004). Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34 (3), 291-338.
- Bolzonella D., Innocenti L., Pavan P., Traverso P., Cecchi F., (2003) Semidry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focus on the start-up phase, *Bioresource Technology*, 86: 123-129.
- Bononi M. and Tateo F., (2009). Identification of Diisobutylphthalate (DIBP) suspected as possible contaminant in recycled cellulose for take-away pizza boxes. *Packaging Technology and Science*, (22), 53-58.
- Boker M. and Harms H. H., (2007). Toxicity and Metabolism of 4-n-Nonylphenol in Cell Suspension Cultures of Different Plant Species. *Environ. Sci. Technol.*, (31), 1849–1854.
- Brevetto US 6 276 300B1
- Brinton W., (2000). *COMPOST QUALITY STANDARDS & GUIDELINES: An International View*
- Bouallagui H., Touhami Y., Ben Cheikh R. , Hamdia M., (2005) Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry* (40), 989–995.
- Cecchi F., Traverso P., Pavan P., Bolzonella D., Innocenti L., 2003 Characteristics of the OFMSW and behavior of the anaerobic digestion process, in: *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, ed. Mata-Alvarez J., Padstow, UK, IWA Publishing.
- Chalbot M.C., Vei I., Lykoudis S., Kavouras I.G. (2006). Particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes in recycled paper processing operations. *Journal of Hazardous Materials A137*, pp 742–751.
- Charles, W., Walker, L., Cord-Ruwisch, R., (2009). Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* 100, 2329–2335.
- CIC- Consorzio Italiano Compostatori (2011). *Compendio tecnico*
- Cipriano V., (2011). *La nuova direttiva rifiuti: gerarchia dei rifiuti.* Federambiente.
- COMIECO (2003). *Il ciclo del riciclo.* A.A.V.V.
- Cossu R., Raga R., (2008). Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste. *Waste Management*, 28, 381- 388.

- D'Amico L., Schiavi G., Silvestri S., (2007). Il ciclo integrato dei rifiuti. Obiettivo Sicurezza.
- Davisson A., Gruvberger C., Christensen T.H., Lund T.H., Cour J.J. (2007). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 27, 406-414.
- De Bertoldi M., (1996). *Science of composting*. Glasgow: Chapman & Hall.
- De Michelis I., Ferella F., Beolchini F., Olivieri A., Vegliò F., (2009) Characterisation and classification of solid wastes coming from reductive acid leaching of low-grade manganiferous ore. *J. Haz. Mat.* (162), 1285-1291.
- Dong Li, Zhenhong Yuan, Yongming Sun (2010). Semidry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS- OFMSW) *Bioresource Technology*, 101, 2722-2728.
- Eftoda, G., McCartney, D. (2004). Determining the critical bulking agent requirement for municipal biosolids composting. *Compost Science and Utilization*, (12) 3, 208-218.
- El-Fadela M., Bou-Zeids E., Chahineb W., Alayli B., (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*, 22, 269-282.
- Environmental Canada. (2013). *Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing*. A.A.V.V., 1-4.
- Epstein (1997). *The Science of composting*. Technomic Publishing Company. Pennsylvania, U.S.A.
- Federambiente (2010). *Rapporto sulle tecniche di trattamento dei rifiuti urbani in Italia*. A.A.V.V..
- Fleming K., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A., 2008. Generation of airborne particles from different bedding materials used for horse keeping. *Equine Vet. Sci.* 28,7,408-418.
- Fox M., Noike T., 2004. Wet oxidation pretreatment for the increase in anaerobic biodegradability of newspaper waste. *Bioresource Technol.* 91, 273-281.
- Franklin, (1986). *Characteristics of Municipal Solid Waste in the United States, 1960 to 2000*. Franklin Associated Ltd. Prairie Village, KS.
- Freney, J.R., Simpson, J.R., Denmaead O.T., (1983). Volatilisation of ammonia. Pages 1-32 in *Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-soil System*. Ed. Martinus Nijhoff/Dr W Junk, The Hague, The Netherlands.
- Furiano A., (2008). *Tecnologie di separazione, selezione e riciclo degli imballaggi in plastica. La gestione integrata dei rifiuti*. 63° Corso di aggiornamento in Ingegneria sanitaria- Ambientale. Politecnico di Milano. Cap.X.

- Garlipp F., Hessel E.F., van den Weghe H. F.A., (2011). Characteristics of gas generation (NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems. *J. of Equine Veterinary Science*, 1-13
- Haug R.T., (1986). Composting process design criteria. Aeration. *BioCycle*, (27) (9), 53-57.
- Heudorf U., Mersch- Sundermann V., Angerer J., (2007). Phthalates: Toxicology and exposure. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 110 (5), 623-634.
- Huber M. and Franz R., Identification of migratable substances in recycled high density polyethylene collected from household waste Fraunhofer Institute of food Tecnology and Packaging.
- ISPRA, (2013), Rapporto Rifiuti 2013
- Groenestein C.M., Oosthoek J., Faassen H.G., (1993). EAAP Publication, (69), 318-323.
- Hansen K. H., Angelidaki I., Ahring B. K., (1998). Anaerobic Digestion Of Swine Manure: Inhibition By Ammonia Water Research, (32)1, 5-12.
- Hogan J.S., Smith K. L., Todhunter D.A., Schoenberger P. S., (1990). Bacterial counts associated with Recycled Newspaper bedding. *J Dairy Sci*, (73), 1756-1761.
- Huang G.F., Wong J.W.C. , Wu Q.T., Nagar B.B., 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Manage.* 24, 8, 805-813.
- Kawata K., Asada T., Oikawa K., (2005). Determination of pesticides in compost by pressurized liquid extraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1090, 10-15.
- Khan S.J., Roser D.J., Davies C.M, Peters G.M., Stuetz R.M., TUcjer R., Ashbolt N.J., (2008). Chemical contaminants in feedlot wastes: concentrations, effects and attenuation. *Environmental International* (34), 839-859.
- Knackmuss Hans-Joachim, (1996). Basic knowledge and a prespective of bioelimination of xenobiotic compounds. *Journal of Biotechnology*, (51), 287-295.
- Komilis, D.P., Ham, R.K., and Park, J.K., (2004) "Production of Volatile Organic Compounds during Composting of Municipal Solid Wastes," *Water Research*, 38(7), 1707-1714.
- Kraus & Grammel (1992). Farm waste heavy mettle, herbicide • News paper Pb • Animal manure pathogens, anti biotic How waste handling affects compost quality: House Trash MSW compost Dioxin concentration (ng/kg) in waste and composts. *Bio Compost* , 9.
- Krzysteka L., Ledakowicza S., Kahleb H.J., Kaczoreka K., (2001) Degradation of household biowaste in reactors. *Journal of Biotechnology*, (92) (2), 103-112

- Jones K. and Huang W., (2003). Evaluation of toxicity of the pesticides, chlorpyrifos and arsenic, in the presence of compost humic substances in aqueous systems. *Journal of Hazardous Materials*, (103), 93-105.
- Leiva C., Ahumada I., Sepulveda B., Richter P. (2010) Polychlorinated biphenyl behavior in soils amended with biosolids. *Chemosphere* (79), 273-277.
- López M, Soliva M, Martínez-Farré FX, Fernández M, Huerta-Pujol O. Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resour Conserv Recycl* 2010; 54: 222-228.
- Malpei F, Gardoni D., (2008). La digestione anaerobica: i principi del processo biologico e i criteri di dimensionamento. In: Renato Vismara, Francesca Malpei, Massimo Centemero. *Biogas da rifiuti solidi urbani*, Ed. Flaccovio, p. 53-78.
- Mambretti S., Roverato C. (2007). Idec S.r.l. Osservatorio Regionale Compostaggio A.R.P.A.V. C.I.C. I fattori che influenzano la qualità della frazione organica.
- Mackay D. (1991). *Multimedia environmental models: the fugacity approach*. Lewis Publishers
- Mata-Alvarez J. (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA Publishing.
- Mato S., Cereijo D., Ferro J., Villar, I., Rodríguez-Abalde A., Pérez D., Domínguez Domínguez M., Patiño J. (2006). Aptitude for composting of the organic fraction selected by mechanical methods. Case study at “Serra do barbanza” environmental facility (A. Coruna, Spain), *Proceedings of the International Conference ORBIT*, 2006.
- Menikpura SNM, Sang-Arun J., Bengtsson M. (2013). Integrated solid waste management: an approach for enhancing climate co-benefits through resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 58 (1), 34-42.
- Misselbrook T.H., Powell, J.M., (2005). Influence of bedding material on ammonia emissions from cattle excreta. *J. dairy Sci.* (88), 4304- 4312.
- Muller W., (2013). The effectiveness of recycling policy options: Waste diversion or just diversions?. *Waste Management*, (33), 508-518.
- Nallathambi Gunaseelan V. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass Bioenergy* 1997; 13 (1/2): 83-114.
- Nolan, A.L., Lombi, E., McLaughlin, M.J. (2003). Metal bioaccumulation and toxicity in soils - Why bother with speciation?. *Australian Journal of Chemistry*, 56 (2-3), 77-91.
- Nguyen P.H.L., Kuruparan P., Visvanathan C., (2007). Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill. *Bioresource Technology*, 98 (2), 380-387.
- Qian Song S. and Lyons Regan E. (2006). Characterization of Background Concentrations of Contaminants Using a Mixture of Normal Distributions. *Environ. Sci. Technol.* (40), 6021-6025.

- Olesszczuk P., (2007). Changes of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of sewage sludges with chosen physico-chemical properties and PAHs content. *Chemosphere* (67), 582-591.
- Ozaki A., Yagamuchib Y., Fujita T., Kuroda K., Endo G., (2004). Chemical analysis and genotoxicological safety assessment of paper and paperboard used for food packaging. *Food and Chemical Toxicology*, 42 (8), 1323-1337.
- Panza D., De Feo G., Belgiorno V. (2005). Quality of the stabilized organic fraction from mechanical and biological treatment, *Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*, CISA publisher, S. Margherita di Pula, Cagliari, 3-7 ottobre.
- Pahl O., Firth A., MacLeod I., Baird J., (2007). Anaerobic co-digestion of mechanically biologically treated municipal waste with primary sewage sludge- A feasibility study. *Bioresource Technology*, 99: 3354-3364.
- Paré T., Diné H., Schnitzer M., (1999). Extractability of trace metals during co-composting of biosolids and municipal solid wastes *Biology and Fertility of Soils*, (29), 1, 31-37.
- Raichura, A., McCartney, D., (2006). Composting of municipal biosolids: Effect of bulking agent particle size on operating performance, (5)3, 235-241.
- Rao M.S., Singh S.P., (2004). Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield–organic loading relationships for process optimisation. *Bioresource Technology* 95, 173–185
- Robinson H.D., Knox K., Bone B.D., Picken A., (2005). Leachate quality from landfilled MBT waste. *Waste management*, 25, 383-391.
- Servos, M.R., R.J. Maguire, D.T. Bennie, H-B. Lee, P.M. Cureton, N. Davidson, R. Sutcliffe and D.F.K. Rawn. 2000. Canadian Environmental Protection Act. Priority Substances List. Supporting document for nonylphenol and its ethoxylates. Environment Canada, Toxics Pollution Prevention Directorate, Commercial Chemicals Evaluation Branch, Ottawa. Unpub. doc.
- Sharma V. K., Canditelli M., Fortuna F., Cornacchia G. (1997). Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review. *Energy Conversion Management*, 38: 453-478.
- Sidique S.F., Joshi S. V., Lupi F., (2010). Factors influencing the rate of recycling: An analysis of Minnesota counties. *Resources, Conservation and Recycling*, (54), 242-249.
- Sirini P., Tchobanoglous G., La Diega R. (2010). *Ingegneria dei rifiuti solidi*. Milano: Mc Graw Hill.
- Slack R.J., Gronow J.R.; Voulvoulis N. (2005) Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate. *Science of the Total Environment*, (337), 119-137.

- Smith S. R. (2008). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste compost compared to sewage sludge. *Environmental International*, 35: 142-156.
- Smook G.A., (1982). Handbook for pulp and paper technologists. Joint Textbook Committee of the paper industry.
- Song YS, Park J., Komolprasert V.. (2000) Analytical procedure for quantifying five compounds suspected as possible contaminants in recycled paper/paperboard for food packaging. *J. Agric. Food. Chem.*, (48), 5856-5859.
- Suler D.J., Finstein M.S., 1977. Effect of temperature, aeration, and moisture on CO<sub>2</sub> formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Appl Environ. Microb.* 33(2), 345-350.
- Sutcu M., Akkurt S., (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceram. Int.* (35), 2625-2631.
- Sturaro A. Parvoli G. Rella R., Bardati S., Doretta L., (1994). Food contamination by diisopropylnaphthalenes from cardboard packages. *International Journal of Food Science & Technology* (29), 593-603.
- Swinker A.M., Tanner M.K., Johnson D.E., Benner L., (1998). *J. of Equine veterinary science*, (18), 28-31.
- Swinker AM, Tanner MK, Johnson ME, Benner L (1997) Composting characteristics of bedding materials. Fort Worth, Texas, USA: Proceedings of the Fifteenth Equine Nutrition and Physiology Symposium. pp 358-363
- Tanner MK, Swinker AM, Beard M.L., Cosma G.N., Traub-Dargatz J.L., Martinez A.B., Olenchock S.A., (1997). Effect of phone book paper versus sawdust and straw bedding on the presence of airborne gram-negative bacteria, fungi and endotoxin in horse stalls. *J. Equine Vet. Sci.* 18(7), 457-461.
- Tambone F. , Scaglia B. , Scotti S. , Adani F. (2011). Effects of biodrying process on municipal solid waste properties, *Bioresource Technology*, 102: 7443- 7450.
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1993). Integrated solid waste management- Engineering Principles and management issues. Irwin McGraw-Hill. 39-67.
- Tiquia S.M., Tam N.F.Y., Hodgkiss I.J., 1996. Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents. *Bioresource Technol.*, 55,3, 201-206.
- Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T. (2009). Biodrying for mechanical- biological treatment of wastes: A review of process science and engineering, *Bioresource Technology*, 100: 2747-2761.
- Vighi M., Bacci E. ,(1998). *Ecotoxicologia*. Ed. UTET

- Vincenti E., Venturini L., Butturini B. (2003). New absorbent materials for litter for small animals made from waste materials. Ital. Appl. IT2001VR0128 A1 20030528.
- Vismara R., Malpei F., Centemero M., (2008). Biogas da rifiuti solidi urbani. Ed. Flaccovio
- Vismara R., Canziani R., Malpei F., Piccinini S. (2011), “Biogas da agrozootecnica e agroindustria”. Ed. Flaccovio
- Vorkamp, K., Taube, J., Herrmann, R., (1999). Estimation of pesticide degradation and distribution during anaerobic digestion on the basis of their physico-chemical properties. International Conference “Anaerobic Digestion of Solid Wastes”, Barcelona, E, June 15-18.
- Zhu N., 2007. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. Bioresource Technol. 98(1),9-13.